



Tielaitos

Anu Repo

Ilola-Sannainen pt 11863 painuman korjaus rengasrouherakenteella

Raportti rakentamisesta ja seurantamittauksista



Tielaitoksen
selvityksiä

19/1998

Helsinki 1998

TIEHALLINTO
Uudenmaan tiepiiri

Tielaitoksen selvityksiä
19/1998

Anu Repo

**Ilola-Sannainen pt 11863
painuman korjaus rengasrouherakenteella**

Raportti rakentamisesta ja seurantamittauksista

Tielaitos
TIEHALLINTO
Uudenmaan tiepiiri

Helsinki 1998

ISBN 951-726-428-3
ISSN 0788-3722
TIEL 3200510

Edita Oy
Helsinki 1998

Julkaisua saatavana:
Tielaitos, Uudenmaan tiepiiri
Asiakaspalvelupiste
Puh. 0204 44 151
Telefax 0204 44 2717



Tielaitos
TIEHALLINTO
Uudenmaan tiepiiri
PL 70
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 44 151

Asiasanat rengasrouhe RR2, kevennysmateriaali, päällysrakenne, kantavuus, ympäristövaikutukset

Tiivistelmä

Tämä työ on raportti rengasrouhekoekohteen rakentamisesta ja seurantamittauksista. Koetieosuus (350 m) sijaitsee Ilola-Sannainen paikallistiellä 11863. Uudenmaan tiepiirin rakennusprojekti P7 toteutti kohteen rakentamisen kolmessa viikossa elosyyskuussa 1997. Rengasrouhetta (RR2) hyödynnettiin koekohteessa kevennysmateriaalina, jolla korjattavan tien tasausta pystyttiin korottamaan enimmillään noin 80 cm. Koekohteen rakentaminen oli toinen vaihe Säkkipäline Oy:n ja Tielaitoksen yhteistyöprojektista, jonka tavoitteena on tutkia renkaiden soveltuvuutta tierakentamiseen ja edistää rengastuotteiden käyttöä maarakentamisessa laajalti.

Tässä koerakentamisraportissa on kerrottu koekohteen suunnittelusta, rakentamisesta ja seurantamittauksista ja lisäksi raporttia varten on ensimmäiset mittaustulokset analysoitu. Tutkimushankkeen tärkeimpiä tavoitteita on arvioida rakentamisesta saatujen kokemusten ja seurantamittausten analysoinnin perusteella rengasrouheen soveltuvuutta tie- ja maarakenteisiin. Koetien seurantajärjestelmään kuuluvat kantavuusmittaukset, painuma- ja siirtymämittaukset sekä ympäristövaikutusten arviointi vesinäytteiden kemiallisilla analyyseilla.

Kohteen rakentaminen sujui erittäin hyvin ja aikataulun mukaisesti. Materiaalin työstäminen muotoonsa oli helppoa ja luiskien reunoilla pystyi helposti työskentelemään ilman, että tapahtui rakenteen leviämistä sivuille. Isomman puskukoneen käyttö olisi kuitenkin järkevää tulevissa kohteissa, jolloin materiaalin levitysmatka olisi pidempi ja rakenteen tiivistyminen samalla tehokkaampaa. Päällysrakenteen rakentamisessa rakennekaksuus 0,7-0,8 m oli selvästi kriittinen kohta, jolloin tierakenne jämäköityi riittävästi jyräksen aloittamiseksi.

Rengasrouhekohteen kantavuusmitoitus oli suunnittelun vaikein ja epäselvin kohta, jonka tutkimista tarvittaisiin huomattavasti lisää esim. FEM-laskelmien avulla. Päällysrakenteen paksuuden arviointi Ilola-Sannainen koetielle tehtiin ulkomaisten koekohdetietojen sekä APAS-ohjelmalla tehtyjen laskelmien perusteella. Rakentamisen aikana ja jälkeen tehdyistä kantavuusmittauksista todettiin mitattujen E_2 -arvojen olevan pieniä ja taipumasuppiloiden erimuotoisia verrattuna normaaleilla rakennekerroksilla rakennettuihin teihin. Kohteen päällystäminen eikä teräsverkko vaikuttanut tien kantavuuden kasvuun merkittävästi. Tulevilla kantavuusmittauksilla ja koerakenteen silmämääräisellä kunnon arvioinnilla yritetään selvittää rengasrouhetien kantavuuden kehittymistä ja arvioida käytetyn päällysrakennepaksuuden ja kantavuuden riittävyyttä.

Ensimmäisten lysimetrikaivosta ja pohjavesiputkesta otettujen vesinäytteiden kemiallisten analyysien perusteella rengasrouheesta ei liukene haitallisissa määrin metalleja eikä PAH-yhdisteitä. Vertailtaessa koekohteen ensimmäisiä liukoisuustutkimuksia VTT:n vesiravistelutestin tuloksiin sekä ulkomaisissa koekohteissa mitattuihin pitoisuuksiin havaitaan, että pitoisuudet ovat melko lähellä toisiaan. Kuitenkin vasta pitempiaikaisella vesinäytteiden tarkkailulla saadaan selville todellinen kuva rengasrouheesta liukenevista aineista. Koekohteessa ympäristötarkkailua jatketaan 10 vuoden ajan.

Key words shredded tires, lightweight fill, overburden structure, bearing capacity, environmental impacts

Abstract

This work is a report of 350 meter long testroad constructed with scrap tires. Road is situated in local road 11863 Ilola-Sannainen near city of Porvoo. In that test embankment was shredded tires used as lightweight material to repair settlements of the road. Constructing the testroad was a second part of the co-operation project between SäkkiVäline and Finnish National Road Administration. The main purpose of this teamproject is to examine and evaluate if old tires are suitable for road construction and furthermore to make progress in using tire products widely constructing different kind of earth structures.

Designing and constructing methods of the Ilola-Sannainen test road are told in this report. Furthermore first results of observation measurements during and after construction work and laboratory analysis are presented and analyzed. One of the main purposes of constructing this road was to get information of working methods with tire chip material and the going of the construction project and also evaluate the suitability of shredded tires to road structure. Observation system of test road consists measurements of bearing capacity, settlements and environmental impacts by chemical testing of the water samples (lysimeter well and groundwater pipe).

Constructing the test road progress very well and on schedule. Shaping the tire chip material and working on the embankment shoulder was easy. One observation during the construction work was that in the future it would be reasonable to use bigger bulldozer (40 tons). With help of that the spreading distance could be longer and compaction of the structure more efficient. Not until making the super structure height of about 0.7 to 0.8 meters the whole road structure has enough bearing capacity to start the compaction work with help of static roller.

Determining the bearing capacity (thickness of the super structure) of the road structure made of shredded tires was the most difficult and demanding part of the design project. So much more research work is needed for example by analyzing the tire chip structure with finite element method (FEM- calculations). In this Ilola-Sannainen road the thickness of super structure was determined partly by literature studies of foreign test roads and partly by calculations with APAS-program (analytical super structure designing program). The first results of bearing capacity measurements by heavy weight deflectometer (E2 - results, [MPa]) during and after the construction were found quite low and the shape of deflecting curves were very different compared to observations from conventional roads. Covering the road with bituminous layer (60 mm) and installing the steel net inside the super structure didn't have remarkable influence on the bearing capacity. In the future there will be taken more bearing capacity measurements and observations of test roads surface condition to find out how the bearing capacity will develop and estimate the sufficiency of super structure thickness.

First chemical tests of water samples taken from test roads ground water pipe and collection well (lysimeter) verifies that the leaching of metals and PAH-compounds (Polycyclic aromatic hydrocarbons) from tire material is not harmful. Comparing the test roads first environmental leachate analysis to VTT's (Technical Research Centre of Finland) leaching test and foreign test embankments results it's noticed that the contents of leaching substances are quite similar. However only with long-term observations of water samples it's possible to get a true picture about leaching substances from shredded tires. In this Ilola-Sannainen road area environmental observations will continue at least for 10 years.

Alkusanat

Tämä raportti rengasrouheella rakennetusta koekohteesta on tehty Uudenmaan tiepiirissä. Koerakentamisen toteutti Uudenmaan tiepiirin Projekti P7, jonka projektipäällikkönä toimi Seppo Mäenpää, työmaapäällikkönä Raimo Malinen ja työkohteen mestarina Pentti Koskiranta. Uudenmaan tiepiirissä koekohteen suunnittelusta vastasi DI Veli-Matti Uotinen. Tielaitoksen ja Sähkökivälineen yhteistyöprojektin osalta DI Mikko Smura oli mukana koeprojektin käynnistäjänä ja valvojana.

Raportin koerakentamisesta ja seurantamittauksista on laatinut Anu Repo.

Helsingissä maaliskuussa 1998

Tielaitos

Uudenmaan tiepiiri

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
 1 JOHDANTO	 9
 2 KOEKOHTTEEN KUVAUS	 11
2.1 Koekohtteen valinta	11
2.1.1. Koetien sijainti ja ympäristö	11
2.1.2. Pohjasuhteet	12
2.1.3. Koehankkeen tarpeellisuus	12
2.2 Koerakenne	12
 3 KOERAKENTEEN SUUNNITTELU	 15
3.1 Lähtötiedot suunnittelulle	15
3.1.1 Vanhat suunnitelmat ja pohjatutkimukset	15
3.1.2 Kirjallisuusselvitys	15
3.1.3 Esitutkimukset laboratoriossa	15
3.2 Geotekniset mitoituslaskelmat	16
3.2.1 Yleistä koerakenteen mitoituksesta	16
3.2.2 Stabiiliteetti	16
3.2.3 Painuminen	17
3.2.4 Päällysrakenteen paksuus	17
3.3 Rakentamisen työselitys	19
3.4 Instrumentoinnin suunnittelu	19
 4 KOEKOHTTEEN RAKENTAMINEN	 21
4.1.Konekalusto ja työmenetelmät	21
4.2 Rakentamisen kulku	22
4.3 Kaivutyöt	22
4.4 Rengasrouherakenne	23
4.5 Päällysrakenne	25
4.6 Kuivatus	28
 5 SEURANTAMITTAUKSET	 30
5.1 Kantavuusmittaukset	30
5.1.1 Levykuormituskokeet	30
5.1.2 Pudotuspainokokeet	31

5.1.2.1 Mittausten suoritus koekohteessa	31
5.1.2.2 Mitatut kantavuusarvot	31
5.1.2.3 Taipumasuppilot	32
5.1.2.4 E-moduulin takaisinlaskenta	34
5.1.3. Levykuormitus- ja pudotuspainokokeiden tulosten vertailu	35
5.2 Painuma- ja siirtymämittaukset	36
5.2.1 Potentiometrit	36
5.2.2 Painumanastat	38
5.3 Ympäristövaikutukset	39
5.3.1 Pohjavesiputki ja lysimetrit	39
5.3.2 Kemialliset analyysit koekohteen vesinäytteistä	40
6 KOKEMUKSET RAKENTAMISESTA JA SEURANTAMITTAUSTEN ANALYSOINTI	43
6.1 Rakentamisen aikaiset havainnot	43
6.2 Koerakenteen kantavuus	43
6.2.1 E ₂ -kantavuusarvojen analysointi	44
6.2.2 Kantavuus taipumasuppiloiden perusteella	45
6.3. Rengasrouhekerroksen kokoonpuristuminen	46
6.4 Koetien painuminen	47
6.5 Rengasrouheen ympäristövaikutukset	48
7 TOTEUTUNEET RAKENTAMISEN MASSAT JA KUSTANNUKSET	52
8 YHTEENVETO	53
9 LIITTEET	57

1 JOHDANTO

Rengasrouhe on autonrenkaista leikkaamalla valmistettava kevyt ja kestävä uusiomateriaali, jota on jo hyödynnetty laajalti Yhdysvalloissa tien rakennusmateriaalina. Tätä uutta materiaalia on nyt Suomessa ensimmäistä kertaa kokeiltu tien rakentamisessa. Uudenmaan tiepiiri toteutti elo-syyskuussa 1997 koerakennuskohteen Ilola-Sannainen 11863 paikallistiellä, jossa rengasrouhetta käytettiin kevennysmateriaalina tien painuman korjaamiseen noin 350 metrin matkalla yhteensä noin 3700 m³. Koekohde sijaitsee pehmeikköalueella, jossa tulvavesi on keväisin noussut tien pinnalle aiheuttaen liikennöintiongelmia. Rengasrouhe on hyvien teknisten ominaisuuksien lisäksi edullinen rakennusmateriaali, joten tien tasauksen nosto oli teknis-taloudellisesti järkevä toteuttaa rengasrouhe-kevennyksellä. Tässä koerakennusraportissa on kerrottu em. kohteen suunnittelusta, rakentamisesta ja seurantamittauksissa.

Koekohteen rakentaminen liittyy Säkkipäline Puhtaanapito Oy:n ja Tielaitoksen yhteistyöprojektiin, jonka tavoitteena on tutkia renkaiden soveltuvuutta tierakentamiseen ja edistää autonrenkaista valmistettavien tuotteiden käyttöä valtakunnallisesti. Projektin ensimmäisessä vaiheessa on tehty esiselvitys, jossa kirjallisuuden perusteella tutkittiin rengasrouheen teknisiä ominaisuuksia sekä materiaalin muita hyödyntämiskohteita tierakentamisen lisäksi. Kirjallisuusraportin lisäksi esitutkimusvaiheessa keväällä -97 VTT:n Yhdyskuntatekniikan ja Kemiantekniikan laboratorioissa selvitettiin rengasrouheen mekaanisia ominaisuuksia sekä ympäristövaikutuksia liukoisuustestien avulla.

Tässä koerakennusraportissa esitelty rengasrouhekohteen on suunniteltu Uudenmaan tiepiirissä. Tien geotekninen suunnittelu perustui esitutkimusvaiheessa selvitettyihin parametreihin. Koehankkeeseen suunniteltu rengasrouhe on RR2-materiaalia (n. 5 x 5 cm²). Kevennyksen mitoitus tehtiin painumalaskelmien avulla, jossa maapohjalle arvioitu lisäkuorma vaihteli välillä 0-2,5 kPa. Penkereen vakavuus ei laskelmien mukaan aiheuttanut ongelmaa ja lisäksi rengasrouhe toimii tehokkaana lämmöneristeenä mahdollista roudan tunkeutumista vastaan. Rengasrouhe-kerroksen paksuus vaihtelee suunnitelmassa 0,35-1,35 m välillä. Päällysrakenteen paksuudeksi arvioitiin 1,16 m ulkomaisten koekohdetietojen sekä APAS-ohjelmalla suoritettujen laskelmien perusteella.

Tutkimushankkeen tärkeimpiä tavoitteita on arvioida rakentamisesta tehtyjen havaintojen perusteella (työmenetelmät, koneet) rengasrouheen soveltuvuutta tien rakentamiseen. RR2-materiaalin suuren joustavuuden vuoksi koehankkeen tärkeimpiä tavoitteita on kuitenkin tutkia koetien kuormituskestävyyttä eli kantavuutta liikennekuormia vastaan, jonka avulla saadaan tietoa tarvittavasta päällysrakenteen paksuudesta tai tarvittavista vahvisteista kantavuuden lisäämiseksi. Lisäksi rengasrouheella saavutettu kevennysvaikutus pyritään tutkimaan siirtymämittausten avulla. Rengasrouhekerroksen kokoonpuristuvuutta voidaan arvioida kahteen poikkileikkaukseen asennetun potentiometrin mittaustuloksista.

Yksi yhteistyöprojektin tavoitteista on saada rengasrouhe yleiseksi tie- ja maarakentamisen rakennusmateriaaliksi. Tämä edellyttää materiaalin ympäristöön aiheuttamien vaikutusten tutkimista ympäristöviranomaisten

vaatimusten mukaisesti sekä laboratoriossa että koerakenteilla. Tämän vuoksi Ilola-Sannainen koekohteeseen rakennettiin erityinen vedenkeräysjärjestelmä (lysimetrit + vedenkeräyskaivo) rengasrouhekerroksen läpi virtaavan veden keräämiseksi analysointia varten. Vesinäyte kemiallisia analyysejä varten otetaan keräyskaivosta kaksi kertaa vuodessa keväisin ja syksyisin. Rengasrouheen ympäristövaikutusten arviointia on tarkoitus jatkaa ainakin 10 vuoden ajan.

Tässä raportissa on esitelty koekohteen suunnittelun pääperiaatteet ja rakentamisen sekä rakenteen seurantamittausten päälinjat ja tavoitteet. Raportin pääkohdat painottuvat koekohteen rakentamisen kuvaamiseen ja RR-rakenteen kantavuuden analysointiin. Tässä selvityksessä on esitetty kaikki julkaisuhetkeen mennessä kertyneet koetien mittausten tulokset, joiden perusteella on arvioitu rakenteen toimivuutta. Pää tavoitteena on kuitenkin saada kuva materiaalin soveltuvuudesta tien rakenteisiin, mikä saadaan selville vasta pitkäaikaisempien mittausten ja havaintojen perusteella.

Tieosuus sijaitsee pehmeiköllä Bölen ja Sannaisten I-luokan pohjavesialueilla. Nämä em. pohjavesialueet ovat yhteydessä toisiinsa ja koeosuus on näiden alueiden rajalla. Sannaisten pohjaveden laatu on I-luokkaa ja Bölen II-luokkaa rauta- ja kloridipitoisuuksien takia. Koehankkeelle jouduttiin hakemaan ympäristölupaa Porvoon kaupungin ympäristönsuojelulautakunnalta, koska rengasrouheen hyödyntämistä tierakenteessa voidaan pitää jätelain 43 §:n mukaisesti jätteen käsittelynä ja lisäksi koeosuus sijaitsee I-luokan pohjavesialueella.

2.1.2. Pohjasuhteet

Koekohde sijaitsee pehmeiköllä, jossa painuvien maakerrosten paksuus vaihtelee välillä 10-26 metriä. Luonnollinen maanpinta on alueella tasolla noin +1,5...+2,5m. Pohjavesiputkesta (PL 1060) joulukuussa -97 mitattu pohjavedenpinta on tasolla -0,69. Maanpinnassa on heikohko kuivakuorikerros, jonka paksuus on noin 1 metri. Kuivakuoren alla varsinkin lähellä Ilolanjoen uomaa on savista/siltistä liejua (saLj/siLj) paksuimmillaan 10 metrin verran. Tämän pehmeän liejukerroksen alla on pääosin lihava savikerros (li-Sa), jonka alapuolella on tiiviimpi vaihtelevan paksuinen maakerros silttiä, hiekkaa ja paikoin moreenia.

Pehmeille maakerroksille määritetyt vesipitoisuudet vaihtelevat liejukerroksilla 120-175 %:n ja liSa-kerroksilla 50-120 %:n välillä. Siipikairalla mitattu leikkauslujuus vaihtelee kuivakuoren alapuolisessa heikoimmassa kerroksessa 9-12 kPa ja sen alla savi/lieju-kerroksissa siipikairauslujuus on 15-25 kPa.

Häiriintyneiden näytteiden rakeisuuskokeissa maakerrosten hienoaainespitoisuudet (# 0,074mm) olivat yli 70% ja suurimmalla osalla näytteistä hienoaainespitoisuus oli välillä 90-100%. Rakeisuuden perusteella pehmeikön vedenläpäisevyysero on pieni ($k \leq 1 \times 10^{-8}$ m/s), joten tiiviit maakerrokset pidättävät hyvin mahdollisesti rengasrouheesta liukenevia pitoisuuksia.

2.1.3. Koehankkeen tarpeellisuus

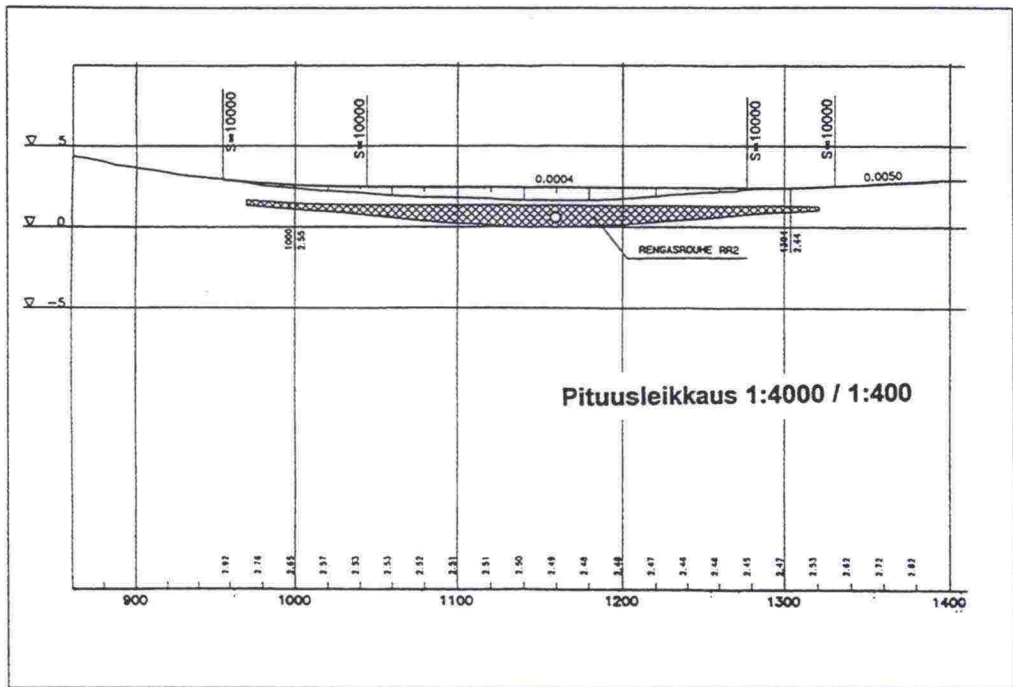
Ilolanjoen vedenpinta nousee keväisin ja joskus myös syyssateiden aikaan aiheuttaen tulvia lähiympäristössä. Pahimmillaan vedenpinta oli noussut jopa 40 cm tien pinnan päälle katkaisten siten tien liikenteen kokonaan. Tulva-veden lisäksi tien kallistukset olivat muodostuneet liian suuriksi epätasaisten painumien ja routimisen johdosta. Tämä oli aiheuttanut ajoittain liikennöintiongelmia raskaalle liikenteelle.

Ratkaisu tulvan aiheuttamiin haittoihin oli tien tasauksen nosto niin, ettei vesi nouse tien pinnan tasolle. Tulvaongelmaa oli pyritty aiemmin ratkaisemaan ajamalla kantavan kerroksen mursketta tierakenteeseen, mutta ratkaisu oli ollut vain tilapäinen lisääntyneiden painumien takia. Vuonna 1993 tien tasausta oli nostettu 0,1-0,4 metriä normaaleilla rakennekerroksilla. Tämän korjauksen jälkeen painumat olivat vajaassa 4 vuodessa kehittyneet pahimmissa kohdissa 100-150 mm:iin. Ennen vuonna -93 tehtyä tasauksen korottamista vanha tie oli paikoin painunut jopa 400 mm alkuperäisestä tasauksestaan.

Näiden em. seikkojen vuoksi tasauksen korottaminen Ilola-Sannainen paikallistiellä oli teknis-taloudellisesti järkevää uudella kevennysmateriaalilla rengasrouheella (RR2). Materiaali on kevennysominaisuutensa lisäksi kilpailukykyinen hinnaltaan ja lisäksi se ei ime vettä itseensä juuri lainkaan ja mitoituksessa ei tarvitse huomioida nosteen vaikutusta.

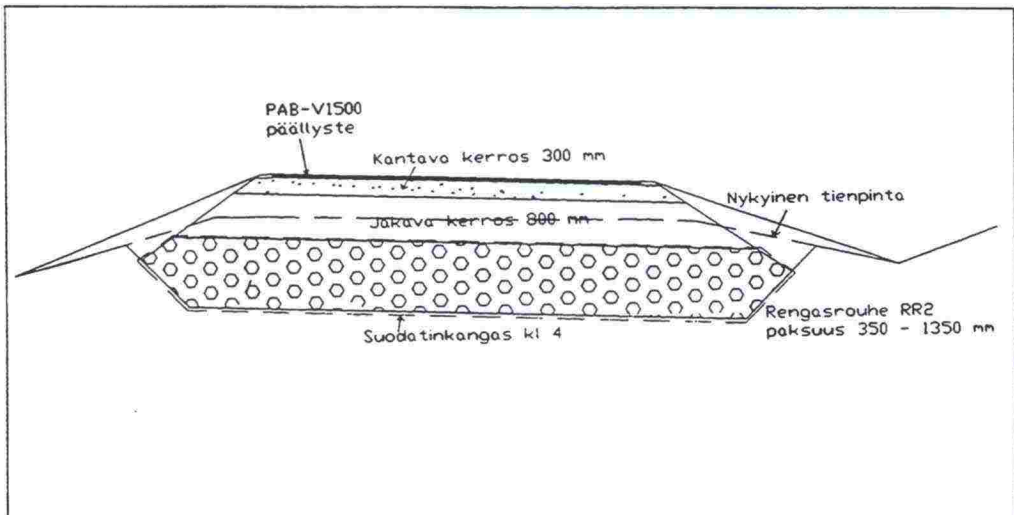
2.2 Koerakenne

Tien tasauksen nosto tehtiin rengasrouheella paaluvälillä plv 970-1320. Tasausta nostettiin tien matalimmassa kohdassa (PL 1220) eniten eli noin 80 cm. Kuvassa 2 on esitetty koeosuuden pituusleikkaus, josta nähdään suunnitellun rengasrouhekerroksen paksuuden vaihtelevan 0,35-1,35 metrin välillä.



Kuva 2. Ilola-Sannainen pt 11863. Pituusleikkaus koekohteesta.

Koerakenteen suunnittelu oli kokonaisuudessaan painuma- ja kantavuuslaskelmilla suoritettu optimointitehtävä. Koerakenteen suunnittelun ja geoteknisten laskelmien pääperiaatteet on esitetty tarkemmin raportin luvussa 3. Kuvassa 3 on rengasrouhetien tyyppipoikkileikkaus, josta näkyvät rakennekerrosten paksuudet.

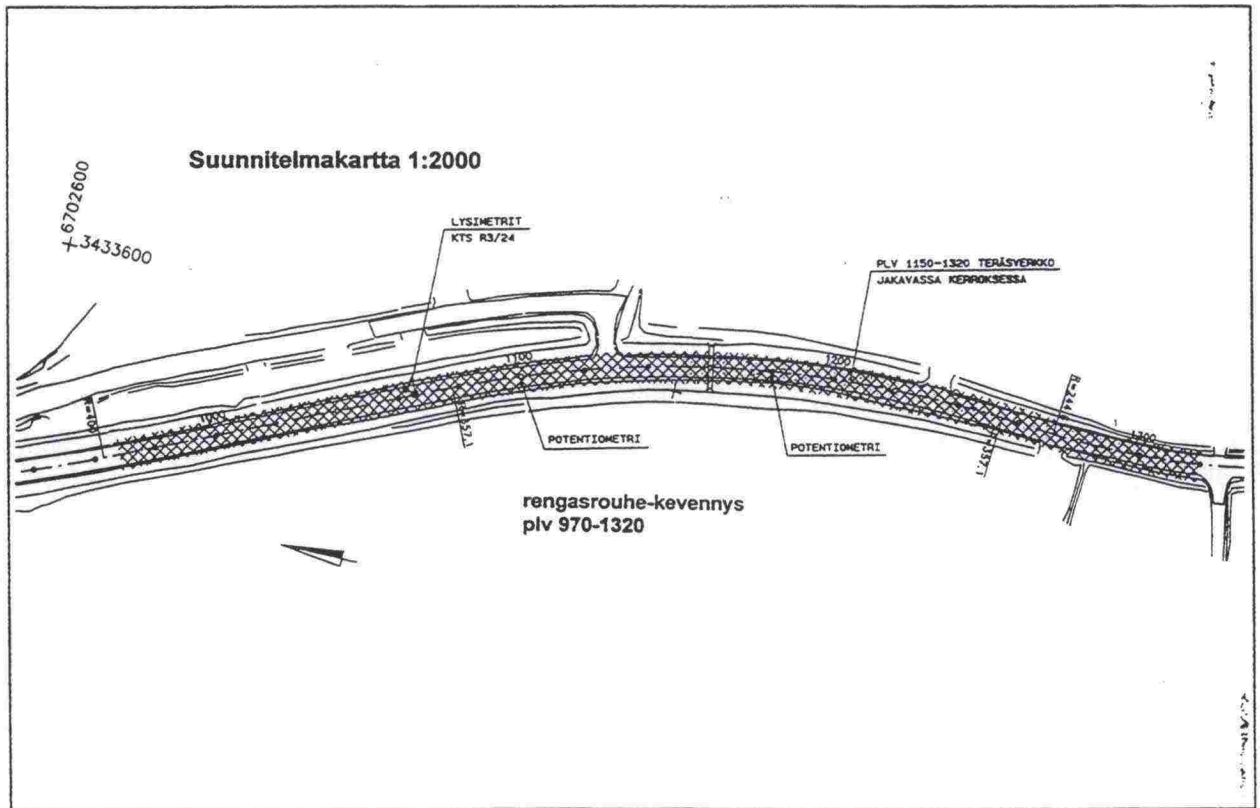


Kuva 3. Rengasrouherakenteen tyyppipoikkileikkaus.

Päällysrakenteen paksuudeksi suunniteltiin koko koeosuudelle 1,16 metriä. Tiepenkereen luiskien kaltevuus vaihtelee välillä 1:2...1:3, koska näin saatiin sivuajat pysymään entisillä paikoilla ja tiealuetta ei jouduttu leventämään. Päällysteeksi valittiin pehmeä asfalttibetoni PAB-V1500, koska tällä pyrittiin

estämään RR2-kerroksen joustavuuden mahdollisesti päällysteelle aiheuttamaa halkeilua.

Lisäksi koeosuteeseen suunniteltiin asennettavaksi koemielessä rengasrouherakenteen jäykisteeksi teräsverkko jakavan kerroksen sisään välille plv 1150-1320. Verkko asennettiin noin 0,9 metrin syvyydelle tien pinnasta. Teräsverkon sijainti on esitetty kuvan 4 suunnitelmakartassa, josta voidaan myös nähdä rakentamisen yhteydessä asennettujen potentiometrien ja lysiimetrien paikat.



Kuva 4. Suunnitelmakartta koeosuudesta.

3 KOERAKENTTEEN SUUNNITTELU

3.1 Lähtötiedot suunnittelulle

3.1.1 Vanhat suunnitelmat ja pohjatutkimukset

Ilola-Sannainen paikallistielle 11863 oli vuonna 1993 tehty vaurioiden korjaussuunnitelma, joka toteutettiin korottamalla tien tasausta 0,1-0,4 metrin verran uusilla rakennekerroksilla. Tämä aiheutti vain suuria lisäpainumia, joten korjaus oli vain tilapäinen.

Tämän jälkeen vuonna 1994 Uudenmaan tiepiirissä oli laadittu rakennussuunnitelma tien tasauksen nostamiseksi kevytsorakevennyksellä. Vanhoja 1970-luvun maaperätutkimuksia täydennettiin tuolloin uusilla kairauksilla ja lisäksi otettiin maanäytteitä vakavuus- ja painumalaskelmia varten. Rengasrouheella rakennetun koetien linjaus pysyi samana kuin alkuperäisen tien. Keväällä 1997 kartoitettiin osuus plv 820-1640 ja alueesta tehtiin maastomalli suunnittelua varten. Pohjatutkimuksia ei kuitenkaan täydennetty. Koehanketta varten ei jouduttu lunastamaan lisää maa-aluetta.

3.1.2. Kirjallisuusselvitys

Säkkivälineen ja Tielaitoksen yhteistyöprojektin ensimmäisessä vaiheessa keväällä -97 tehtiin esiselvitys 'Renkaiden hyödyntäminen tierakenteissa' /Repo 1997/, jossa kirjallisuuden avulla selvitettiin rengasrouheen materiaaliominaisuuksia sekä mahdollisia hyödyntämiskohteita tierakentamisen lisäksi. Taulukossa 1 on esitetty esiselvityksestä hyödynnetyt tiedot Ilola-Sannainen koerakenteen suunnittelua, rakentamista ja seuranta varten.

Taulukko 1. Esiselvityksen tiedot pt 11863 Ilola-Sannainen koekohteen toteuttamista varten.

Koehankkeen osavaihe	Esiselvityksestä saatu/arvioitu parametri / tieto	Miten/mihin tieto on hyödynnetty suunnittelussa?
Suunnittelu	- keskim. tilavuuspaino $\gamma=6,5 \text{ kN/m}^3$ - kitkakulma $\phi = 28^\circ$ - jäykkyyshmoduuli $E=1 \text{ MN/m}^2$ - Poissonin vakio $\nu=0,25$	Geotekniset laskelmat - vakavuus - painuminen - rakenteen kantavuus (APAS, FULGEO)
Rakentaminen	- mahdolliset ongelmat kuormauksessa - tiivistystyöhön pusku- ja traktori - materiaalin kokoonpuristuminen 10-15 % kerrospaksuudesta - suodatinkangas RR2 ympärille	- työmenetelmien ja -koneiden valinta - materiaalienekki - arvio tarvittavasta päällysrakenteen paksuudesta
Seuranta	- seurantajärjestelmä koekohteissa (painumalevy, siirtymämittaus, potentiometri, kantavuusmittaus) - ympäristövaikutusten arviointi (lysimetri RR2-kerroksen alle)	- olisi mahdollista myös tutkia roudan vaikutuksia - mitä aineita/pitoisuuksia liukenee - analysoitujen pitoisuuksien vertailu tulevaisuudessa koekohteen arvoihin

3.1.3. Esitutkimukset laboratoriossa

Kirjallisuustutkimuksen ohessa keväällä -97 suoritettiin rengasrouheelle tutkimuksia Tielaitoksen Geopalvelukeskuksen sekä VTT:n laboratorioissa. Tielaitoksen laboratoriossa määritettiin rengasrouheen rakeisuus sekä irto-

ja kiintotiheydet. VTT:n Yhdyskuntatekniikan laboratoriossa selvitettiin rengasrouheen mekaanisia ominaisuuksia rasialeikkaus- ja kolmiakselikokeilla (irtotiheys γ , kitkakulma ϕ' , koheesio c' , jäykkyyssmoduuli E ja Poissonin vakio ν). Esiselvityksen liitteissä 1 ja 2 on esitetty em. laboratoriotutkimusten tulokset, joista erityisesti E -moduulin ($E=1,05 \text{ MN/m}^2$) arvoa käytettiin Ilola-Sannainen koetien päällysrakenteen suunnittelussa.

Rengasrouheen pitempiaikaisten ympäristövaikutusten arviointia varten koe-kohteeseen rakennettiin erityinen vedenkeräysjärjestelmä (lysimetri) vesinäytteiden ottoa varten. Koehankkeen ympäristölupaa varten jouduttiin kuitenkin suorittamaan ennakkoon testejä rengasrouheesta veteen liukenevien aineiden määrittämiseksi. Liukoisuustestit tehtiin toukokuussa -97 VTT:n Kemiantekniikan laboratoriossa. Näitä ennakkotestien tuloksia on esitetty tämän raportin luvussa 6.5, jossa on vertailtu VTT:n tuloksia koekohteesta analysoituihin vesinäytteisiin.

3.2. Geotekniset mitoituslaskelmat

3.2.1 Yleistä koerakenteen mitoituksesta

Suunnitelma Ilola-Sannainen paikallistiellä 11863 tehdyn painuman korjaamiseksi rengasrouheella perustui pääasiassa rakenteen painuma- ja kantavuuslaskelmiin, joilla optimoitiin kevennyksen ja päällysrakenteen paksuus niin, että saatiin aikaan riittävä kevennysvaikutus ja tien kuormituskestävyys (kantavuus). Rakenteen optimoinnissa otettiin lisäksi huomioon vaatimukset kustannussäästöistä.

Mitoituslaskelmissa oli rengasrouhekerroksen päälle tarvittavien sitomattomien rakennekerrosten paksuutta vaikein arvioida, koska rengasrouheen mekaanisista ominaisuuksista ja käyttäytymisestä on vielä riittämättömästi tutkimustuloksia. Rengasrouhe poikkeaa lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiltaan huomattavasti normaaleista kiviainesmateriaaleista. Tämän johdosta normaalia kantavuus- ja päällysrakennemitoituksen soveltuvuutta RR-rakenteelle tulisi tutkia lisää, jotta saataisiin kehitettyä oikeat suunnitteluperusteet tulevien kohteiden mitoitusta varten.

Rengasrouheella kevennetyn koekohteen Ilola-Sannainen suunnittelu Uudenmaan tiepiirissä aloitettiin keväällä -97 ennen kuin VTT:n ja Geokeskuksen laboratoriotutkimusten tuloksia rengasrouheen RR2 ($5 \times 5 \text{ cm}^2$) materiaaliparametreista oli käytettävissä (liitteinä esiselvityksessä). Siten kohteen ensimmäiset geotekniset laskelmat (vakavuus, painuminen, kantavuus) perustuivat esiselvityksen parametreihin ja tietoihin. Koerakenteen kantavuusmitoitusta tarkennettiin, kun saatiin tulokset VTT:n määrittämät jäykkyyssmoduulin E ja Poissonin vakion ν arvot.

Tiedot alkuperäisen tien korottamisesta olivat puutteellisia, joten vanhojen rakennekerrosten paksuus arvioitiin painumalaskelmiin. Lisäksi tarkemmat tiedot penkereen painumahistoriasta ja penkereen alapuolisen saven mahdollisesta lujittumisesta olisivat osaltaan tarkentaneet mitoitusta.

3.2.2 Stabiiliteetti

Alkuperäisessä tilanteessa tiepenkereen vakavuus arvioitiin riittäväksi ($F=1,5-1,8$). Lopullista koerakenteen mitoitusta varten työnaikainen ja pitkän ajan stabiiliteetti tarkistettiin paalulta PL 1140, jossa tasauksen korotus on

suurin eli noin 80 cm. Normaaaleilla päällysrakennekerroksilla varmuus olisi ollut noin $F=1.2$. Kaikki vakavuuslaskelmat tehtiin FULGEO-ohjelmalla perustuen $\phi'=0$ -analyysiin. Rengasrouheelle käytettiin vakavuuslaskelmissa tilavuuspainon arvoa väliltä 6-7,5 kN/m³ ja kitkakulmaa 25-27 °.

Lasketut varmuuskertoimet olivat riittäviä, vaikka laskelmissa ei huomioitu vanhan tien pengerkuorman aiheuttamaa alapuolisen saven lujittumista. Myöhemmin kohteen rakentamisen aikana huomattiin vanhan päällysrakenteen olevan arvioitua paksumpi, joten vakavuuslaskelmat olivat selvästi varmallalla puolella.

Nostetta ei vakavuuslaskelmissa tarvinnut huomioida, sillä yksittäiset rengasrouhepalat ovat vettä hieman painavampaa.

3.2.2 Painuminen

Kevennyksen paksuus mitoitettiin painumalaskelmilla siten, että tulevan uuden tien tasausviiva pysyy koko 20 vuoden mitoitusaajan yli arvioidun tulvakorkeuden + 2,20. Laskelmissa otettiin huomioon vanhan tien 17 vuoden kuluessa tapahtunut painuma (arvioitu/mitattu 350 mm) ja aiemmin tehdyt arvioidut tasauksen korotukset, jolloin maapohjalle tulevaksi lisäkuormitukseksi laskettiin 0-2,5 kPa riippuen koeosuuden kohdasta. Koetien alku- ja loppuosalla lisäkuormitusta ei suunniteltu tulevan lainkaan. Parametrit painumalaskelmiin olivat vuoden 1994 suunnitelmaa varten tehdyistä ödometrikokeista.

Tulostus lopullisesta painumalaskelmasta (PL 1200) on esitetty liitteessä 1. Paalulla 1200 alkuperäinen tasaus oli +1,80 ja rengasrouheella korottamisen jälkeen +2,5. Rengasrouheen paksuus oli laskelmissa 1,3 m ja päällysrakenne 1,1 metrin paksuinen. Laskelmissa uuden tierakenteen painuma 20v. mitoitusajalle on saatu vähentämällä vanhan tien painumasta lisäkuormituksen (2 kPa) aiheuttama painuma ja lisäämällä tähän arvoon vanhalle tierakenteelle arvioitu 65 mm:n lisäpainuma ($t=17v \rightarrow 37v$). Painuma korjauksen jälkeen 20 vuoden kohdalla on noin 160 mm eli kohdassa PL 1200 laskelmien mukaan tasaus laskisi tasolle + 2,32, mikä on vielä yli tulvarajan.

Tällainen painumalaskelma olisi mahdollisesti voitu mallintaa elementtimenetelmään perustuvilla ohjelmilla, joilla kuormitusta voidaan lisätä vaiheittain ja jännitystila penkereen alla voidaan analysoida paremmin.

3.2.3 Päällysrakenteen paksuus

Ilola-Sannainen koekohteen päällysrakenteen paksuuden mitoittamisessa huomioitiin osaltaan tietoja Yhdysvalloissa toteutetuista koekohteista, joissa käytetyt päällysrakenteet olivat noin 0,7-1,8 metrin paksuisia riippuen rakennetun RR-kerroksen paksuudesta ja tien laadusta (osa sorapäälysteisiä). Eräässä tutkimuksessa todettiin, että alle 0,9 metrin rakennekerrokset eivät ole kunnolla kestäneet. Näiden tietojen perusteella arvioitiin alustavasti Ilola-Sannainen koekohteen kantavien rakennekerrosten yhteiseksi paksuudeksi 1,0 m.

Lähtötietoina ja alustavina tavoitteina koekohteen kantavuus- ja päällysrakennemitoitukseen olivat:

- tieosuuden **KVL** = 550 ajoneuvoa/vrk ja
KKL / 20v = $4,2-5,1 \cdot 10^5$ liikenteen kasvuprosenteilla 0-2 %
(raskaita ajoneuvoja 4%)
- **4AB** päällysrakenneluokka ja **tavoitekantavuus** 260 MN/m²
päällysteen päältä (90 mm) ja kantavan kerroksen päältä
150 MN/m²

Etukäteen arvioitiin tavoitekantavuuden tulevan olemaan liian korkea saavutettavaksi rengasrouherakenteelle varsinkin, kun lopulliseksi tien päällysteeksi valittiin pehmeämpi asfaltti PAB-V1500. Ilola-Sannainen koetien päällysrakenteen paksuutta arvioitiin sekä perinteisellä kantavuusmitoituksella (Odemarkin kantavuuskaava) sekä analyyttisellä menetelmällä (APAS-ohjelma).

Perinteinen menetelmä (Odemarkin 2-kerrossysteemi) ei täysin soveltunut rengasrouherakenteen mitoittamiseen, koska sillä on vaikeata huomioida kahden E-moduuleiltaan hyvin erilaisen kerroksen rajakohtaa (RR2:E=1 MPa, Sora:E=200 MPa). Menetelmän onkin todettu soveltuvan paremmin tavanomaisten päällysrakenteiden suunnitteluun.

APAS-järjestelmässä laskennat tehdään NOAH-laskentaohjelmalla, joka on kimmoteoriaan perustuva monikerrosohjelma. Rakenne suunnitellaan siten, että standardikuormasta (100 kN) rakenteeseen syntyneet rasitukset (venymät) jäävät riittävän alhaisiksi. Kriittiset rasitukset määräytyvät ns. väsymisfunktioden avulla, joka ilmaisee materiaalin kestävyys suhteellisenä muodonmuutoksena (venymänä) kuormitusluvun suhteen. Rengasrouheella ei luonnollisesti ole väsymisfunktiota, mutta materiaali on kuitenkin hyvin elastinen sietäen hyvin toistuvia ja suuria muodonmuutoksia eikä siten ole kriittinen rakennekerros. Kun mitoituslaskelmissa määritetään rakenteelle kuormituskertaluku (KKL), saadaan väsymisfunktion avulla rakenteen kriittisen materiaalin sallittu venymä ja kestoikä. Yleensä kriittinen venymä muodostuu asfaltin alapintaan. Rakenne mitoitetaan niin paksuksi, että laskettu venymä jää pienemmäksi kuin väsymisfunktion avulla ratkaistu sallittu venymä.

Varsinaista APAS-laskentaa varten lähtötietoina annettiin rakennekerrosmateriaalien E-moduuli, Poissonin vakio ja kerroksen paksuus sekä tiedot liikkennemääristä. Ensimmäiset laskelmat tehtiin asfalttibetonisella päällysteellä, joka muutettiin lopulliseen mitoituslaskelmaan pehmeäksi PAB-V300 päällysteeksi. Tämä uusi öljysoraa korvaava päällystetyyppi kestää paremmin suuria muodonmuutoksia ja halkeamien syntyessä se pystyy hyvin joutumaan itse. Rakentamisen aloittamisen yhteydessä haettiin vielä lisävarmuutta päällysteen kestävyysmuuttamalla sideaine vielä pehmeämmäksi V1500.

Laskelmien perusteella sitomattomien kerrosten paksuutta kasvattamalla ei ollut kuin vähäinen vaikutus asfaltin alapinnan venymään. Myöskään rengasrouheen E-moduulin ja kerroksen paksuuden vaihtelulla ollut juuri merkitystä mitoituksen kannalta. Suurin vaikutus rakenteen mitoituksen antamaan tulokseen oli päällysteen tyyppin ja paksuuden valinnalla. Mitä pehmeämpää bitumia päällysteessä käytetään sitä suurempia venymiä päällyste kestää. Liitteenä 2 on APAS-laskelmilla mitoitettun lopullisen rakenteen mitoitusra-

portti. Mitoituksen perusteella kriittisin kerros olisi kantava kerros (elinikä 18v).

APAS- ohjelmalla ei kuitenkaan saada rakenteella mahdollisesti saavutettavan kantavuuden arvoa, jota voitaisiin esimerkiksi verrata koerakenteen kantavuusmittausten tuloksiin. Rengasrouherakenteen päällysrakenteen mitoittamiseksi olisi järkevää suorittaa laskelmia esim. FEM-ohjelmilla, joilla jännitykset ja siirtymät rakenteessa pystytään luotettavammin määrittämään.

3.3 Rakentamisen työselitys

Koekohteen rakentaminen suunniteltiin noudattamaan Tielaitoksen yleisiä laatuvaatimuksia ja työselityksiä (TYLT). Rengasrouheen rakentamisen suunnitelma perustui esiselvityksestä saatuihin kokemuksiin (koekohteet Yhdysvalloissa). Mittatarkkuuksiin sallittiin yleisesti pienempiä vaihteluita kuin TYLT:n mukaisissa ohjeissa.

Tärkeimmät työselityksessä mainitut rengasrouheen rakentamista ohjanneet asiat olivat:

- rengasrouhe-rakenteen ympäröiminen kokonaan KL4:n suodatinkankaalla
- rakenteen tekeminen 1-2 kerroksessa (yhden kerroksen paksuus 0,4-0,7m)
- materiaalin levittäminen puskutraktorilla ja rakenteen tiivistäminen staattisella jyrällä ajamalla vähintään 6 kertaa rakennetun osuuden päällä
- RR-kerroksen kokoonpuristumisen (10-15%) huomioiminen materiaalmäärissä ja rakentamisen aikana RR-rakenteen yläpinnan tason arvioinnissa
- kuorma-autojen pyörien varominen niiden liikkeessä lähellä rengasrouheen kuormauspaikkaa
- mahdollisten kuormausongelmien (esim. materiaalin jumiutuminen) ennakointi lavojen vesikastelulla

Rakentamisen työmenetelmiä ja -järjestystä tarkennettiin rakennustyön kuluessa. Luvussa 4 on esitetty kohteessa toteutunut järjestys ja töiden aikataulutus sekä kerrottu tarkemmin eri työvaiheiden sujumisesta.

3.4 Instrumentoinnin suunnittelu

Ilola-Sannainen pt 11863 koekohteen seurantajärjestelmä suunniteltiin yksinkertaiseksi, koska näin menetellen välttyttiin tutkimasta liikaa asioita suhteellisen pienessä koehankkeessa. Koekohteen seurantajärjestelmän päätaivitteina on saada tietoa seuraavista asioista:

- RR2-materiaalin soveltuminen tierakentamiseen
- rengasrouhekerroksella saavutettava kevennysvaikutus
- koetien kuormituskestävyyden tutkiminen
- materiaalin ympäristövaikutusten pitkäaikainen arviointi

Koehankkeen seurantamittaukset jakaantuivat kahteen osaan:

A. *Rakennusaikana tapahtuva seuranta*

- kantavuusmittaukset (laadunvalvonta rakennusaikana)
- vaaitusmittaukset (rakennekerrosten toteutuneet tasot, kerrospaksuuksien arviointi)
- rakennustyön seuranta (työmenetelmät ja -koneet)

B. *Rakentamisen jälkeen tehtävät seurantamittaukset*

- kantavuusmittaukset (kantavuuden kehittyminen)
- tienpinnan vaaitukset (rakenteen painuminen, mahdollisen routimisen arviointi)
- potentiometrimittaukset (RR-kerroksen kokoonpuristuminen)
- pohjavesiputkesta ja lysimetristä otettavien vesinäytteiden analysointi (ympäristövaikutukset)

Luvussa 5 on tarkemmin kerrottu instrumentoinnista ja seurantamittauksista. Raportin julkaisuhetkeen kertyneet mittaustulokset on esitetty ja analysoitu luvuissa 5 ja 6. Liitteen 3 taulukossa on esitetty tulevien seurantamittausten aikataulu (vuodet 1998 ja 1999). Taulukossa on mukana myös heti rakentamisen jälkeen otettujen ensimmäisten mittausten ajankohdat. Koekohteen siirtymämittauksia (vaaitus ja potentiometrit) jatketaan arviolta 5-10 vuoden ajan sekä ympäristövaikutusten arviointia vesinäytteiden analysoinnilla ainakin 10 vuoden ajan (noin vuoteen 2007 saakka).

4 KOEKOHTEN RAKENTAMINEN

4.1 Konekalusto ja työmenetelmät

Rengasrouheen rakentamisessa ei yleisesti tarvita mitään poikkeavaa erityiskalustoa. Pienemmissä koekohteissa Yhdysvalloissa puskutraktoria oli käytetty sekä levitykseen että tiivistämiseen. Joissakin kohteissa oli käytetty täryjyrää, mutta hyöty ei ollut mainittavaa tiivistymisen kannalta ja työ on hankala suorittaa paksun ja joustavan RR-kerroksen päältä. Jyrää on hyödynnetty RR2-rakenteen tiivistämiseen esimerkiksi routakohteissa, joissa rengasrouhekerroksen paksuus on ollut selvästi pienempi (0,3-0,5 m).

Tärkeimmät Ilola-Sannainen -kohteen rakentamisessa käytetyt työkonet on taulukossa 2, jossa on myös esitetty koneiden teknisiä tietoja. Taulukossa 3 on puolestaan eri työvaiheissa käytetyt työkonet. Rengasrouheen kuljetukseen ja kuormaukseen käytetyt kasettiautot olivat Tielaitoksen omaa kalustoa. Tielaitoksen kasettiautoon (2 kasettia) mahtui rengasrouhetta noin 10 tonnia eli noin 20 m³. Muutama rengasrouhekuorma jouduttiin tuomaan Keimolan rengasterminaalini sijaan Lappeenrannasta, jolloin kasettiautot olivat Säkkiälineen autoja (35-40 t). Kuvia työkoneista on esitetty rakentamisvaiheista kertovissa luvuissa 4.3 - 4.5.

Taulukko 2. Työkoneiden teknisiä tietoja.

TYÖKONE (nimi)		Työkoneen tekniset ominaisuudet / tiedot			
		paino [t]	telan leveys [m]	telan pituus [m]	amplitudi [mm]
Komatsu PC 210 LC/-96	kaivinkone	21	0,7	4,2	-
Caterpillar CAT D4E/-80	puskukone	10,8	0,5	2,4	-
James 82 D/-88	pyörätraktori	9,2	-	-	-
Vibromax 1102d/-87	täryjyrä	12,6	-	-	1,6 mm 0,6 mm

Koekohteen rakentaminen tällä em. kalustolla sujui hyvin. Rakentajilta saatiin työkaluston osalta seuraavanlaista palautetta:

- puskutraktori oli sopiva kone rengasrouheen levittämiseen
- sopiva levitysmatka pienellä puskukoneella (CAT D4E) oli noin 50 m
- tiivistystyöhön voisi käyttää isompaa ja painavampaa puskukonetta, jolloin RR2-materiaalia voisi levittää pidempiä matkoja (huom. suuremmat kohteet tulevaisuudessa)
- tulevaisuudessa olisi kiinnostavaa kokeilla kaatopaikoilla käytettävää sorkkajyrää rengasrouheen tiivistämiseen
- kasettiautoista kipattaessa RR2-materiaalia tarvittiin aluksi kaivurin apua ison kasan levitykseen ja sitten levitystä jatkettiin puskukoneella
- rengasrouheen kippauksessa ei esiintynyt 'jumiutumista', joten lavojen vesikastelua ei tarvittu

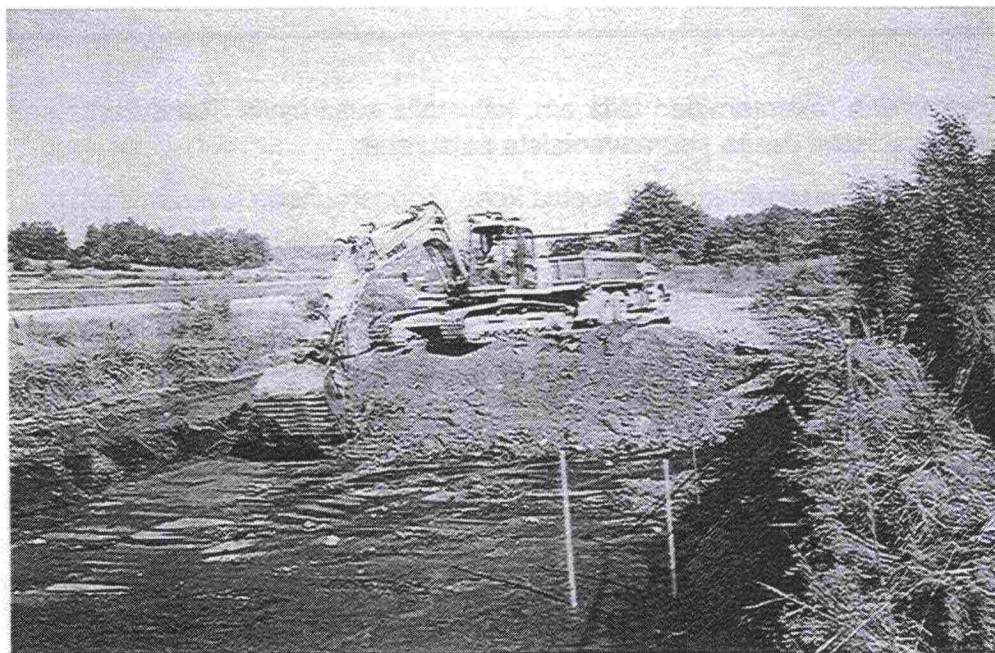
4.2 Rakentamisen kulku

Koekohteen rakentaminen toteutettiin työselityksen mukaisesti ja se sujui aikataulun mukaisesti ilman suurempia viivytyksiä ja ongelmia. Rakentamisen aikana sää oli mitä parhain eikä yhtään sadepäivää osunut ko. ajanjaksolle. Lämpötila vaihteli alkujakson $+29^{\circ}\text{C}$:sta syyskuun alkupuolen kylmempiin päiviin. Rengasrouhe-materiaali ei ime vettä itseensä, joten sade ei olisi kuitenkaan haitannut rakentamista. Kaivutyön onnistuminen olisi ehkä vaikeutunut sateen takia.

Rakentamiseen suunniteltiin alunperin kuluvan 3 viikkoa aikaa. Aloituspäiväksi määrättiin 25.8.-97, jolloin myös tie katkaistiin liikenteeltä. Alustavia tietoita kuten ojien perkausta ja kaapelien siirtoa tehtiin kuitenkin jo edeltävällä viikolla. Liitteessä 4 on esitetty tarkemmin aikataulun muodossa koekohteen rakentamisen kulku ja työjärjestys. Tähdellä merkittyinä päivinä työaika oli huomattavasti normaalia pidempi ja tällöin tehtiin pääasiassa rengasrouherakennetta. Kohteen rakentaminen sujui hyvin nopeasti ja aikataulun mukaisesti ja tie avattiin liikenteelle sovittuna päivänä 12.9.

4.3 Kaivutyöt

Ilola-Sannainen koekohteen kaivutyöt tehtiin noin 5 päivässä kuivan ja lämpimän sään vallitessa. Työ aloitettiin vanhan asfaltin poistamisella, joka tehtiin jyrsimellä materiaalin kierrätyksen takia. Sen jälkeen alkoi varsinainen vanhan rakenteen kaivu kaivinkoneella (kuvat 5 ja 6) Sannaisten puoleisesta päästä noin paalulta 1340. Kaivutyössä eroteltiin sitomattomat rakennekerrokset ja pohjamaan savikerrokset, joista rakennekerrokset läjitettiin tilapäisesti Bölen eritasoliittymän rampin alueelle tulevaa uusiokäyttöä päällysrakenteessa varten. Savimassat läjitettiin pysyvästi rampin läheisyyteen ja ne tulevat olemaan osa VT7 moottoritien ympäristötäyttöä.



Kuva 5. Vanhojen rakennekerrosten kaivua noin kohdasta PL1200.



Kuva 6. Kaivettu leikkauspohja noin paalulle PL 1180 asti.

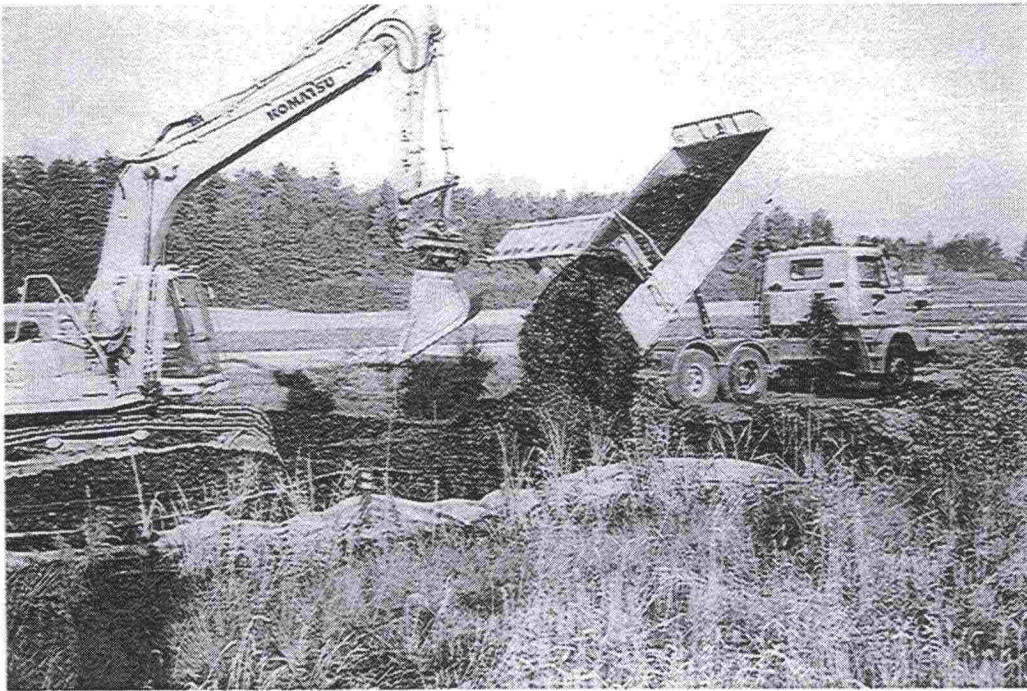
Kuvasta 6 nähdään kuinka kaivettu pohja pysyi kuivana eikä pohjavesi aiheuttanut ongelmia. Kaivutyön edetessä tasoitettulle pohjalle levitettiin KL4:n suodatinkangas, joka limitettiin ainakin 0,5 metrin verran seuraavan kankaan kanssa. Kaivutyön edetessä havaittiin, että alkuperäisiä rakennekerroksia oli enemmän kuin suunnitelmissa oli arvioitu. Kuivakuorta ei jouduttu kaivamaan pois kuin aivan matalimmilta kohdilta, joten rengasrouheen keventävä vaikutus on suunniteltua suurempi.

4.4 Rengasrouherakenne

Rengasrouheen kippaaminen (kuva 7) ja levitys suodatinkankaan päälle aloitettiin koeosuuden keskeltä noin paalulta 1120, josta rakentaminen eteni ensin molempiin suuntiin. Kaivutyön päätyttyä rengasrouhetta kipattiin ja levitettiin pelkästään Ilolan puoleisesta päästä (PL 970). Materiaalin kippauksessa kasettiautoista ei esiintynyt ongelmia, vaan RR2-materiaali valui hyvin pois lavalta, eikä tarvittu vesikastelua.

Aluksi levitys- ja tiivistystyö (kuva 8) tehtiin pelkästään pienellä puskukoneella (10 t) ja myöhemmin isolla tela-alustaisella kaivinkoneella, jolla tasoitettiin rakenteen viimeisin pinta. Isolla kaivinkoneella saavutettiin selvästi puskukonetta parempi rakenteen tiivistyminen, mutta sillä ei kannattanut levittää materiaalia kovin pitkiä matkoja.

RR2-rakenne tehtiin päätypenkereenä noin 2 kerroksessa ja tiivistyskertoja kerrosten päältä oli useita, kun työkonie ajoi edestakaisin kerrosten päällä samalla levittäen ja tiivistäen rakennetta. Materiaalin työstäminen muotoon oli helppoa, joten rengasrouherakenteen luiskien muotoilu suunniteltuun kaltevuuteen sujui hyvin. Luiskien reunoilla pystyi hyvin ajamaan puskukoneella eikä materiaali liikkunut pois paikoiltaan sivusuunnassa. Ajettaessa työkonieilla rakennetun RR-kerroksen päällä oli selvästi havaittavissa materiaalin jousto-ominaisuus, kun rakenteen pinta palautui nopeasti lähes ennalleen työkonieen ajettua tarkkaillun pisteen ohitse.

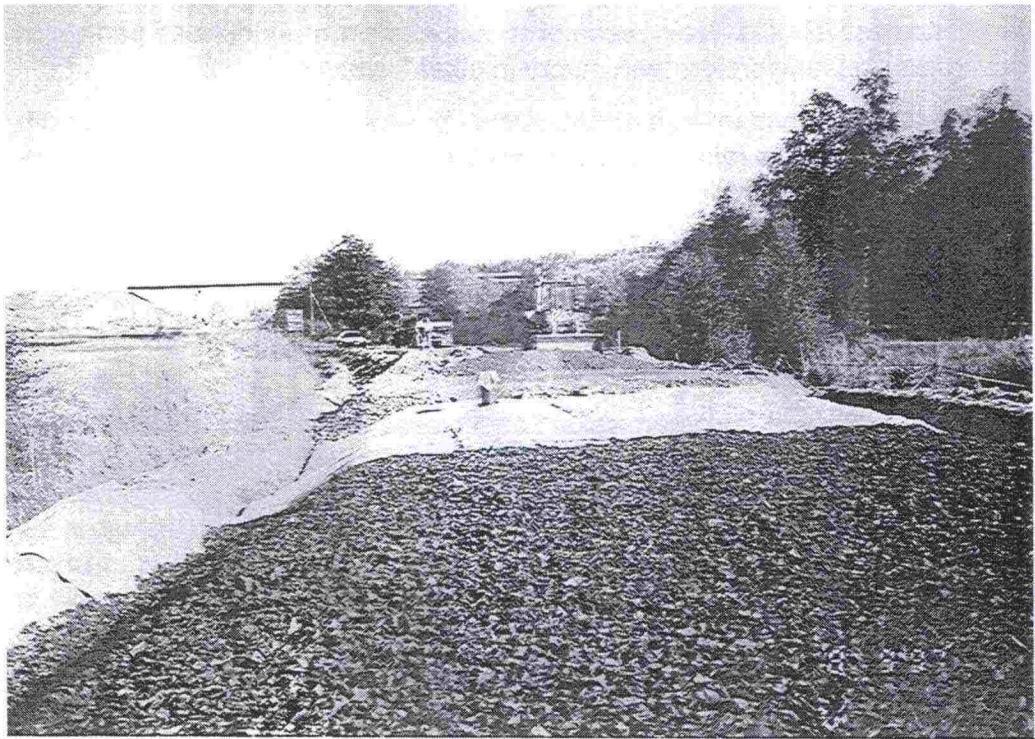


Kuva 7. RR2-materiaalin kippaus ja levitys koerakenteeseen.



Kuva 8. Rengasrouheen levitys- ja tiivistystyötä puskukoneella ja tela-alustaisella kaivinkoneella. Työkoneet työskentelevät noin paalulla 1240.

Valmiin rengasrouherakenteen päälle käännettiin sivuille jätetyt suodatinkankaat siten, että rakenne oli ympäröitynä kokonaan suodatinkankaalla (kuva 9). Tämän jälkeen jakavan kerroksen materiaalia voitiin ajaa rakenteeseen limittäin rengasrouheen rakentamisen kanssa.



Kuva 9. Valmis RR2-rakenne peitettynä ja ympäröitynä KL4 suodatinkankaalla. Jakavan kerroksen materiaalin levitystä traktori-kaivurilla noin kohdalla PL 1160.

Suurin osa RR2-materiaalista tuotiin Keimolan rengasterminaalista. Rakennusprojektin loppuvaiheessa tuli pieniä viivytyksiä toimituksiin, kun materiaali loppui Keimolasta ja sitä jouduttiin kuljettamaan lisää Lappeenrannasta. Tämä viivytti koekohteen valmistumista ehkä yhdellä päivällä. Lähes joka kuormassa oli yksi tai useampi kokonainen autonrengas. Terminaalissa Rengasrouheen ja kokonaisten renkaiden varastoinnin ja kuormauksen laadunvalvontaan terminaalissa kiinnitettävä enemmän huomiota.

4.5 Päälysrakenne

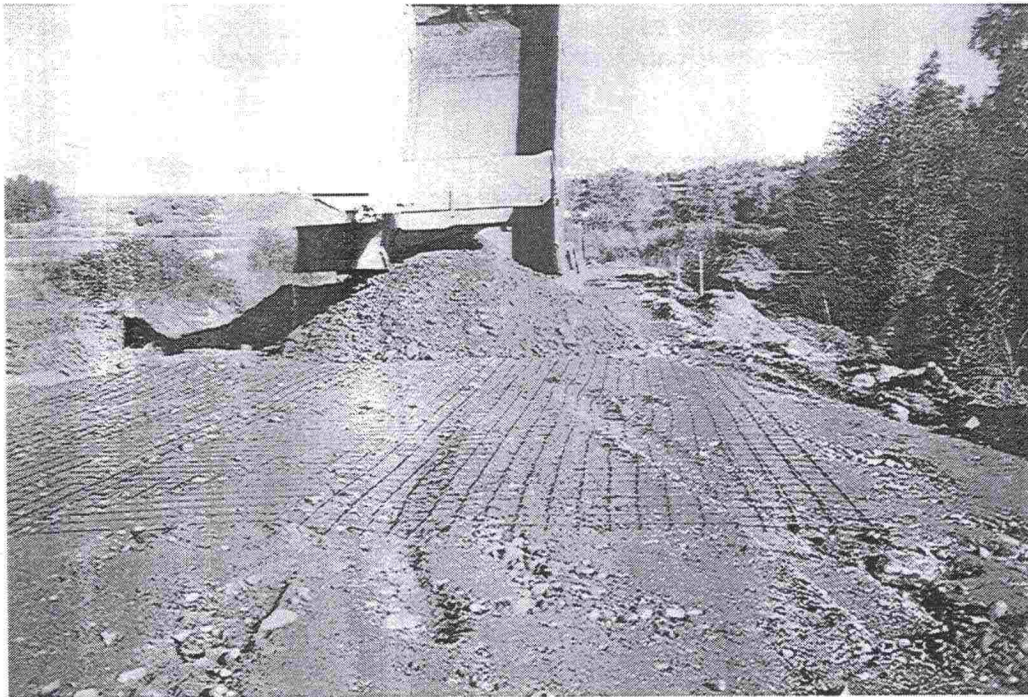
Ilola-Sannainen koekohteen suunniteltu päälysrakenteen paksuus oli 1,16m, josta 800 mm oli jakavaa ja 300 mm kantavaa kerrosta. Päälysteen PAB-V1500 paksuudeksi oli suunniteltu 60 mm. Jakavaan kerrokseen hyödynnettiin ensin Bölen eritasoliittymän rampin alueelle läjitettyjä vanhasta rakenteesta kaivettuja massoja ja loppuosa oli Koskenkylästä tuotua uutta materiaalia (max raekoko 100 mm). Kantava kerros rakennettiin kokonaan uudesta materiaalista (raekoko 0-50mm). Osa kantavan materiaalista oli 0-100 mm. Raekokoa 0-8 mm jouduttiin laittamaan vielä tien pintaan yleisen liikenteen takia.

Jakavaa kerrosta alettiin rakentaa osittain samanaikaisesti rengasrouhekerroksen tekemisen kanssa. Materiaalia alettiin ajaa koeosuuden keskeltä (paalulta 1160) molempiin suuntiin. Ennen päälysrakenteen rakentamista rengasrouhekerroksen sivuille tehtiin jakavan materiaalista tukipenkereet, jonka jälkeen jakava kerros rakennettiin kahdessa noin 400 mm paksussa kerroksessa. Tukipenkereiden rakentamisella pyrittiin estämään rengasrouherakenteen suurempi painuminen keskilinjan alta ja materiaalin leviäminen

tarpeettomasti sivuille. Näin menetellen saavutettiin mahdollisesti paremmin suunniteltu kevennysrakenteen muoto ja oikea paksuus.

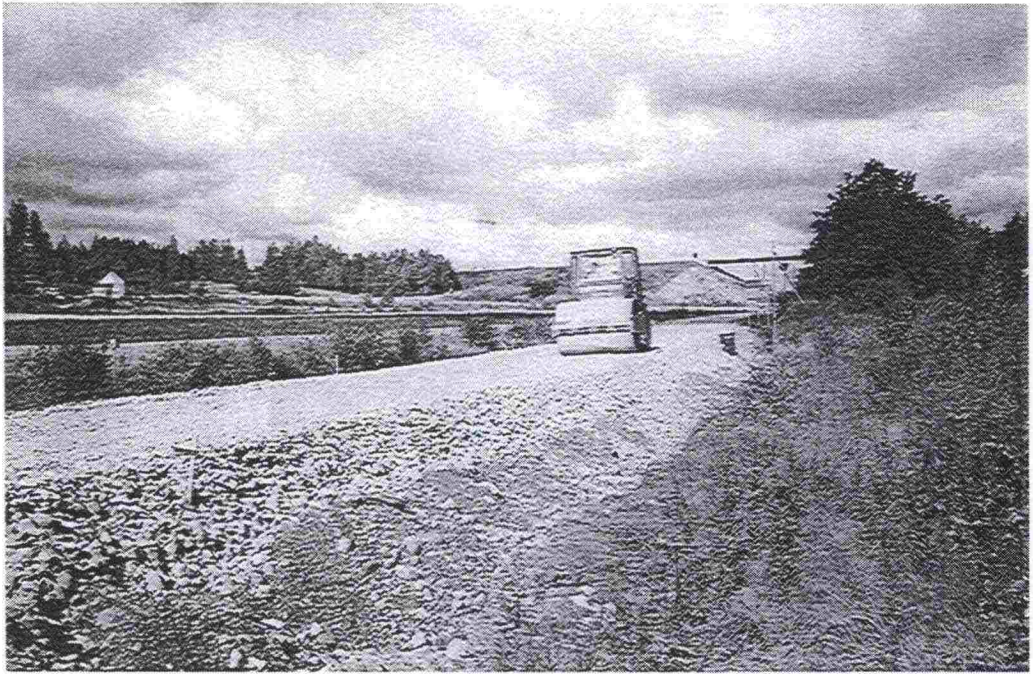
Soramateriaalin levittäminen tehtiin osittain puskukoneella ja osittain traktori-kaivurilla, joilla myös rakenteen tiivistystyö tehtiin aluksi. Rengasrouherakennetta jyrättiin valssijyrällä päällysrakenteen päältä ensimmäisen kerran vasta, kun noin 70-80 cm jakavaa kerrosta oli rakennettu ja rakenne alkoi olla tarpeeksi "jämäkkä". Sitä ennen päällysrakenteen levitys- ja tiivistämisestä jäi aivan selvät ajourat alapuolisen pehmeän ja joustavan RR2-kerroksen johdosta. Jyrätiivistystä kannattaa siten hyödyntää päällysrakenteen tiivistystyöhön vasta, kun koko rakenne on tarpeeksi kantava.

Kevennysrakenteen jäykistämiseksi koemielessä asennettiin teräsverkko jakavan kerroksen sisään (jakavaa rakennettu noin 200-300 mm) paaluvälille 1150-1320 (kuva 10). Verkkona käytettiin harjateräsverkkoa, jossa poikkilangan paksuus oli 7 mm ja sidontateräksen 5 mm. Asennetun teräsverkon silmäkoko on #150-200 mm. Jakavaan kerrokseen asennettuna teräsverkon toimintatapa perustuu sen ominaisuuteen ottaa vastaan vaakajännityksiä ja jakaa muodonmuutoksia laajalle alueelle, jolloin se tasaa rakenteen painumaa ja vähentää vaakasuuntaisia siirtymiä. Verkolla pyritään myös jäykistämään päällysrakennetta, jolloin tierakenteen kantavuuden oletetaan kasvavan.



Kuva 10. Teräsverkko jakavassa kerroksessa (aloituskohta PL 1150) ja jakavan materiaalin kippausta verkon päälle.

Kantava kerros tehtiin Koskenkylän kalliomurskeesta (0-50 mm) yhtenä levitys- ja tiivistyskerroksena (kuva 11). Tiivistäminen tehtiin sileäpintaisella valssijyrällä noin 8 kertaa.

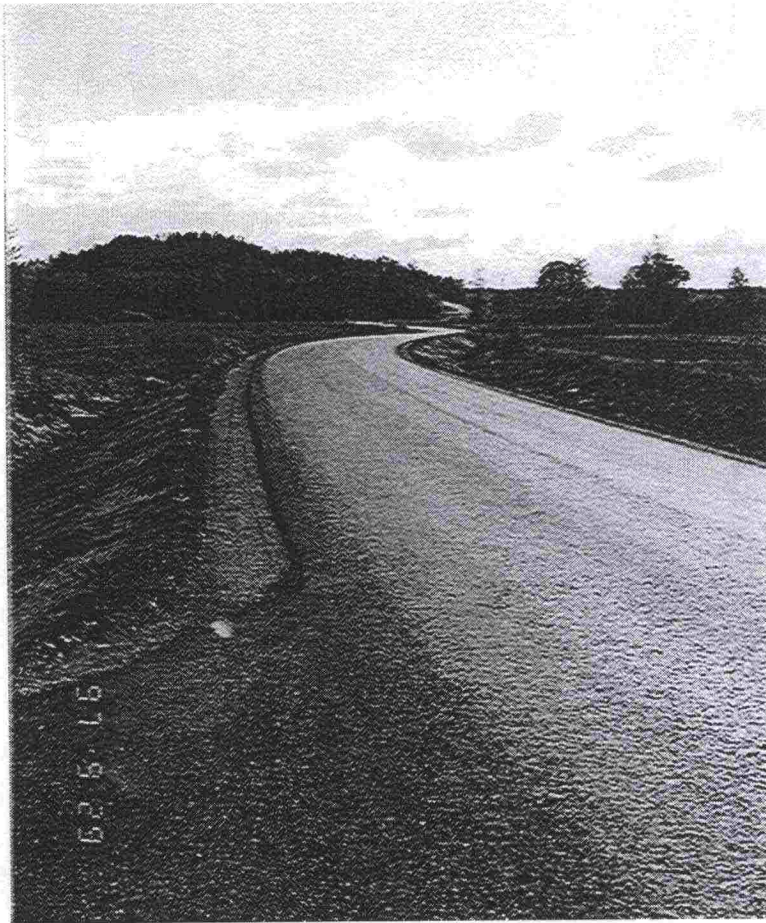


*Kuva 11. Koerakenteen tiivistäminen staattisella jyrällä kantavan kerroksen päältä.
Koeosuus noin väliltä plv 970-1120.*

Koetien päällystäminen ns. pehmeällä asfaltilla tehtiin noin 2 viikon kuluttua kantavan kerroksen valmistumisesta ja liikenteelle avaamista. Päällystämistä ei kannata tehdä heti, jotta saadaan tarpeeksi aikaa rengasrouhekerroksen tiivistymiselle. Öljysoraa korvaavan pehmeän päällysteen sideaineena on käytetty V1500 bitumia. Kuvissa 12 ja 13 on esitetty valmis koetie ennen ja jälkeen päällystämisen. Kuvasta 13 voidaan havaita päällysteen "pehmeä" ja normaalia päällystettä harvempi rakenne.



Kuva 12. Valmis tierakenne ennen päällystämistä. Tie on avattu jo liikenteelle.

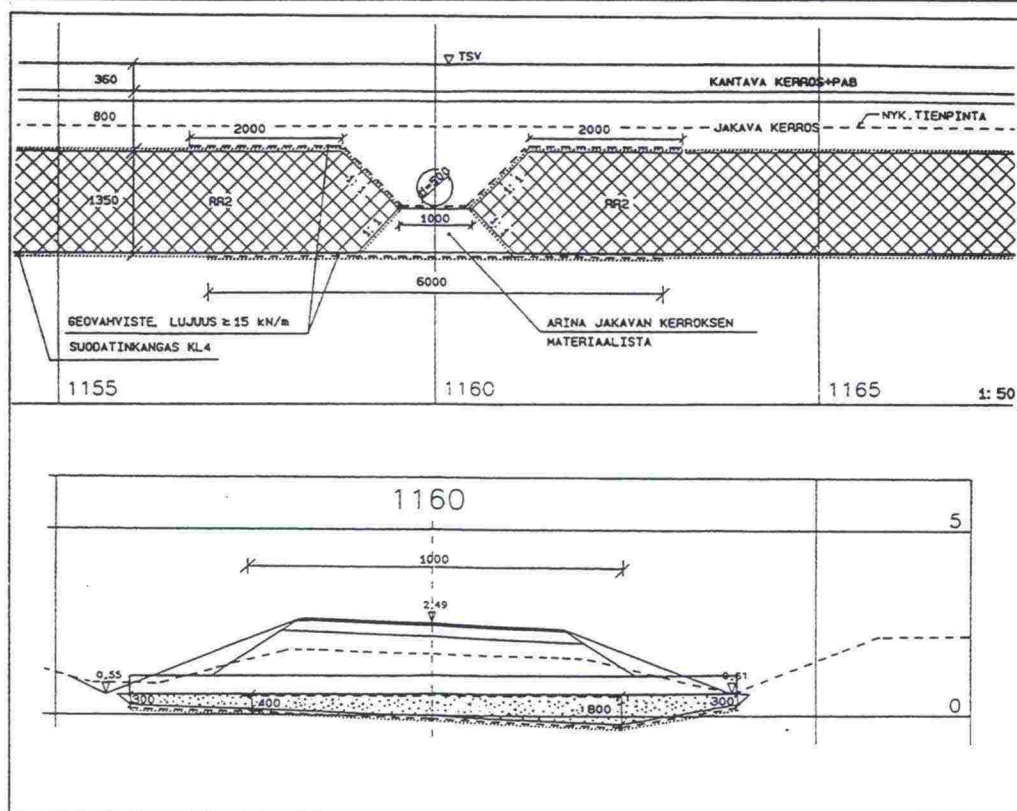


Kuva 13. Valmis tierakenne PAB-V1500 päällystämisen jälkeen.

Rakennetun päällysrakenteen kantavuutta eri rakennekerrosten päältä seurattiin kantavuusmittauksilla (pudotuspaino- ja levykuormituskoe), joiden tuloksia on esitetty ja analysoitu tarkemmin luvuissa 5 ja 6. Luvussa 6.1 on esitetty yhteenvetona koekohteen rakentamisen aikaiset havainnot ja tärkeimmät huomiot tulevaisuuden rengasrouhekohteiden rakentamista varten.

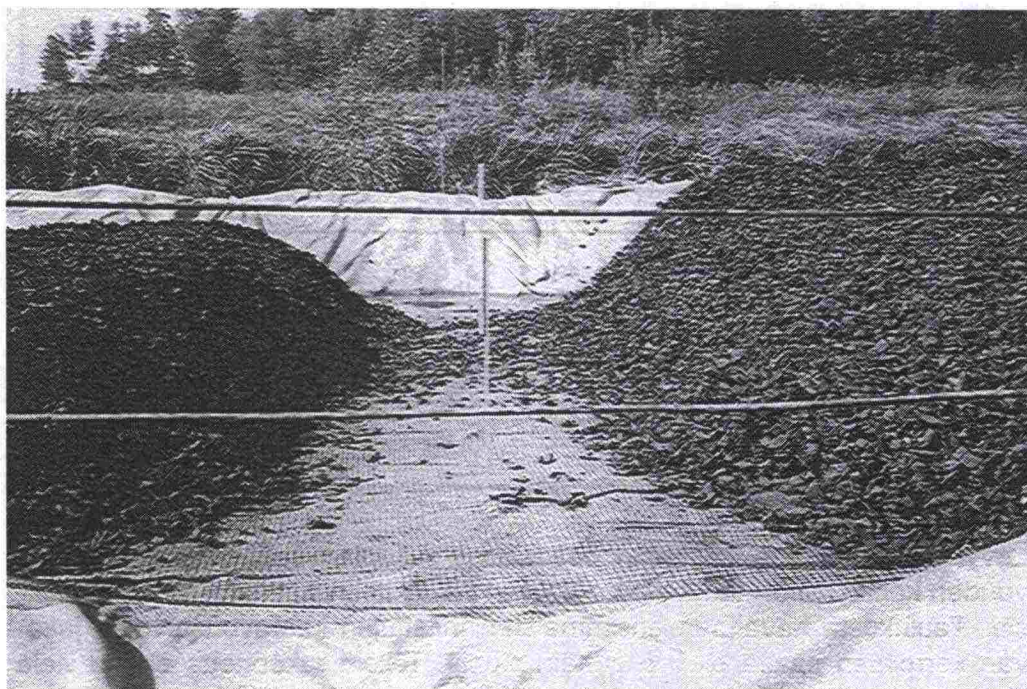
4.6 Kuivatus

Koeosuuden kuivatusjärjestelyt tehtiin kaivamalla sivuojat oikeisiin kaltevuuksiin sekä rakentamalla muovirumpu ($\varnothing 500$ mm) paalulle 1160. Rumpu perustettiin kiviainesarinalle suunnitelmakuvan 14 mukaisesti. Suunnitelma-kuvaan ei ole piirretty jakavan kerroksen teräsverkkoa, joka alkaa paalulta 1165. Rummun kohta lujitettiin kahdella geovahvisteella (lujuus ≥ 15 kN/m). Kuvassa 15 on esitetty rummun rakennusvaihe ennen kiviainesarinan rakentamista ja ennen toisen geovahviteen asentamista.



Kuva 14. Koekohteen kuivatus. Suunnitelmakuva muovirummusta paalulta 1160.

Rummun rakentamisessa oli rakentajien mukaan pieniä vaikeuksia, kun rakenne piti tehdä yhdeltä puolelta rakentaen, jolloin kaivurilla jouduttiin kurkottelemaan pitkälle. Varsinkin ylemmän geovahvisteen asentamisessa oli ollut ongelmia. Koska rummun kohta tehtiin kokonaan kiviaineksesta, niin mitatut kantavuudet siltä kohtaa olivat huomattavasti suurempia.



Kuva 15. Rakentaminen rummun kohdalla (PL 1160) ennen kiviainesarinan rakentamista ja ennen geovahvisteen asentamista.

5 SEURANTAMITTAUKSET

5.1 Kantavuusmittaukset

5.1.1 Levykuormituskokeet

Levykuormituslaite on staattinen kantavuuden mittauslaite, jolla mitataan portaittain nostettavan kuormituksen (10 kN välein) aiheuttamaa tienpinnan painumaa rakenteen kantavuusarvon määrittämiseksi. Maksimikuorman 60 kN aiheuttama lopullinen painuma rekisteröidään, kun painumankasvu hidastuu tasolle 0,1 mm/min. Mittaus suoritetaan kaksi kertaa ja jälkimmäisestä määritetään kantavuus (E_2).

Ilola-Sannainen pt 11863 koekohteessa staattiset levykuormituskokeet tehtiin rakentamisen edistyessä 5 eri vaiheessa taulukon 3 mukaisilta päällysrakenteen tasoilta ja paaluväleiltä. Mittauksia tehtiin 20 metrin välein pääosin mittalinjalta. Jakavan kerroksen päältä tehdyissä kokeissa maksimikuormaksi valittiin 20 kN, jolla pyrittiin paremmin kuvaamaan liikenteen aiheuttaman 60 kN kuorman jakautumista alemmille päällysrakennekerroksille.

Taulukossa 3 on esitetty yhteenvedona levykuormituskokeiden mittaustulokset, jossa kantavuusarvot on esitetty keskiarvoina mitatun koeosuuden tuloksista. Tuloksissa ei ole huomioitu rummun kohdalta mitattua kantavuutta, joka on muuta rakennetta huomattavasti suurempi.

Taulukko 3. Yhteenvedo Ilola-Sannainen pt 11863 koekohteessa tehdyistä levykuormituskokeista. Esitetyt kantavuusarvot paaluvälin keskiarvoja.

	I	II	III	IV	V
Paaluväli	980-1200	980-1163	980-1100	1080-1320	970-1320
Mittauspvm	9.9.	10.9.	12.9.	15.9.	25.9.
Rakennettu kerrospaksuus	530	700	800+300	800+300	800+300
Rakennekerros	jakava	jakava	kantava	kantava	kantava
Kokeen kuormitus [kN]	20	20	60	60	60
E2 [MN/m ²] pienin	9	15	54	77	89
suurin	23	49	90	119	162
keskiarvo	14,29	31,1	73,71	97,21	112,75
E2/E1 pienin	0,95	1	1,58	1,4	1,23
suurin	1,57	1,32	1,97	1,9	2,07
keskiarvo	1,34	1,19	1,82	1,66	1,55
Huomioita	ei jyrätty	ei jyrätty	tie avattiin liikenteelle	jyräys juuri ennen mittausta	tie ollut liikenteellä 13 pv

Levykuormituskoetta käytettiin pääasiassa rakentamisen aikaiseen kantavuuden kehittymisen tarkkailuun. Valmiin päällysteen päältä ei tehty mittauksia. Taulukosta havaitaan ensimmäisten mitattujen kantavuusarvojen jakavan kerroksen päältä olevan erittäin pieniä. Tällöin rakennetta ei oltu vielä tiivistetty jyrällä (vain puskukoneella), koska tienpinta oli selvästi vielä liian joustava. Kuormitus jakavan kerroksen päältä oli myös pieni (20kN), jolloin kantavuusarvot eivät nouse yhtä suuriksi kuin 60 kN:n kuormituksella.

Saavutetut kantavuudet kantavan kerroksen päältä ovat myös yllättävän pieniä. Viimeisellä mittauskerran perusteella keskimääräinen kantavuus kantavan kerroksen päältä koko koeosuudella oli 112 MN/m^2 , kun tavoite on 150 MN/m^2 . Tällöin tie oli ollut liikenteellä 13 päivää, jonka vaikutus kantavuuteen kehittymiseen on noin 15 MN/m^2 ($15.9 \rightarrow 25.9$). Tie avattiin liikenteelle 12.9, jolloin mitattu kantavuus on pieni verrattuna 15.9 mitattuun arvoon. Mittauskerralla III (12.9) viimeisestä tienpinnan jyräyksestä oli aikaa ja pinta oli jo hieman löyhtynyt.

Kantavuusarvojen suhde E_2/E_1 kertoo yleensä normaalirakenteisilla teillä pintakerroksen tiiveydestä ja jyräyksen onnistumisesta. Kuitenkin koekohteen levykuormitustuloksista havaitaan selvästi rengasrouheen jousto-ominaisuuksien vaikuttavan suhdelukua pienentäen sitä enemmän mitä ohuimmat rakennekerrokset ovat RR-kerroksen päällä. Jakavan kerroksen päältä tehdyissä kokeissa (I-II) keskimääräinen E_2/E_1 -luku on reilusti pienempi kuin kantavan kerroksen päältä tehdyissä mittauksissa. Kantavan kerroksen päältä mitatut E_2/E_1 -arvot (III-V) kertovat enemmän tiivistystyön tehokkuudesta (jyräyskerrat) ja tuloksista voidaan todeta lisäksi tiiveyden selvä kehittyminen. Tiiveysvaatimus E_2/E_1 2,2 toteutuu selvästi koekohteessa.

5.1.2 Pudotuspainokokeet

5.1.2.1. Mittausten suoritus koekohteessa

Pudotuspainolaitteessa kuormituksen suuruus on 50 kN. Kuormitustapa on dynaaminen ja pudottamalla kuormitusmassa vapaasti (kuormitusaika 26 ms) 0,14 metrin korkeudelta kuormituslevyn päälle. Kuormituksen aiheuttamat taipumat mitataan kuormituslevyn keskipisteen lisäksi 120 cm etäisyydelle (6 geofonia: D0, D20, D45, D60, D90, D120). Kuormitus tehdään samassa pisteessä kahdesti ja kantavuus E_2 määritetään toisen kuormituskerroksen aiheuttamasta painumasta kuten levykuormituslaitteellakin.

Ilola-Sannainen koekohteessa pudotuspainokokeita tehtiin vasta lähes valmiin koerakenteen päältä (kantava/päällyste), koska menetelmää ei voida luotettavasti soveltaa epätasaisen pinnan kantavuusmittauksiin. Mittaukset suoritettiin 10 metrin välein osittain oikealta ja osittain vasemmalta kaistalta. Mittauskertoja oli 4, joista kaksi kantavan kerroksen päältä ja kaksi päällysteen päältä. Liitteessä 5 on esitetty kaikki mittaustulokset ja mittauskertojen väliset erotukset kantavuuden kehittymisen arvioimiseksi.

5.1.2.2. Mitatut kantavuusarvot

Yhteenvedo kaikista mittaustuloksista on taulukossa 4. Siinä on esitetty yhden mittauskerran tuloksista pienin ja suurin mittausarvo sekä keskiarvo. Taulukon tuloksissa ei ole huomioitu mittauksia rummun (PL 1160) ja vanhan asfaltin päältä (pl 950,1330), joiden kohdalla kantavuusarvot ovat selvästi suuremmat (kts. liite 5). Kaikki kantavuusarvot ovat melko pieniä eikä tavoitetta kantavan kerroksen päältä saavuteta ($4AB \rightarrow 150 \text{ MN/m}^2$), vaikkakin tarkkaa tavoitetta ei rakenteelle voitu vielä määrätä. Rengasrouherakennetta tiivistävä 10 päivän liikenne on vaikuttanut tulosten mukaan $12-18 \text{ MN/m}^2$ ($15.9 \rightarrow 25.9$).

Päällystäminen ei vaikuttanut suuresti kantavuuden paranemiseen ($25.9 \rightarrow 30.9$). Kantavuus kasvoi 15 MN/m^2 paaluvälillä 970-1155 ja 17 MN/m^2 välillä plv 1165-1320 pehmeän päällysteen PAB-V1500 johdosta. Uuden bitumin

ominaisuuksia ei vielä tunneta hyvin, joten sen vaikutusta kantavuuden kehittymiseen verrattuna esim. tavanomaiseen AB-päällysteeseen ei tiedetä tarkasti. Koekohteen kantavuus mitataan pp-laitteella keväällä ja kesällä -98, joiden tuloksista voidaan mahdollisesti tutkia päällysteen kantavuuden kehitystä.

Rakenteen jäykistämiseksi jakavaan kerrokseen asennettu teräsverkon mahdollista vaikutusta kantavuuteen voidaan myös arvioida taulukosta 4, jossa kantavuudet välillä plv 970-1155 ovat keskimäärin 12 MN/m² pienemmät kuin teräsverkollisella osuudella mitatut arvot.

Taulukko 4. Pudotuspainolaitteella mitatut E2-arvot koeosuuksille plv 970-1155 ja plv 1165-1320 (teräsverkollinen).

Mittauspvm	E2-mittaustulokset [MN/m ²]	
	plv 970-1155	plv 1165-1320 (teräsverkko)
15.9 (kantava)		
pienin	64	71
suurin	96	100
keskiarvo	77,2	82,2
25.9 (kantava)		
pienin	72	72
suurin	105	123
keskiarvo	89,3	100,4
30.9 (päällyste)		
pienin	80	85
suurin	123	145
keskiarvo	104,6	117,2
23.10 (päällyste)		
pienin	88	92
suurin	127	156
keskiarvo	108,2	122,6

5.1.2.3. Taipumasuppilot

Kantavuusarvojen lisäksi pudotuspainomittauksista voidaan tulostaa myös taipumasuppilo-kuvaajia, joiden muodon perusteella voidaan paremmin analysoida tierakennetta. Taipumasuppilon muotoon vaikuttavat alusrakenteen ominaisuudet, jotka tulevat ilmi paremmin kaukana kuormituslevystä mitatuista taipumista. Mitä lähempänä kerros on tien pintaa sitä lähempänä kuormituslevyä mitattuun taipumaan se vaikuttaa. Maksimitaipuman arvoon vaikuttaa kuitenkin koko tierakenne.

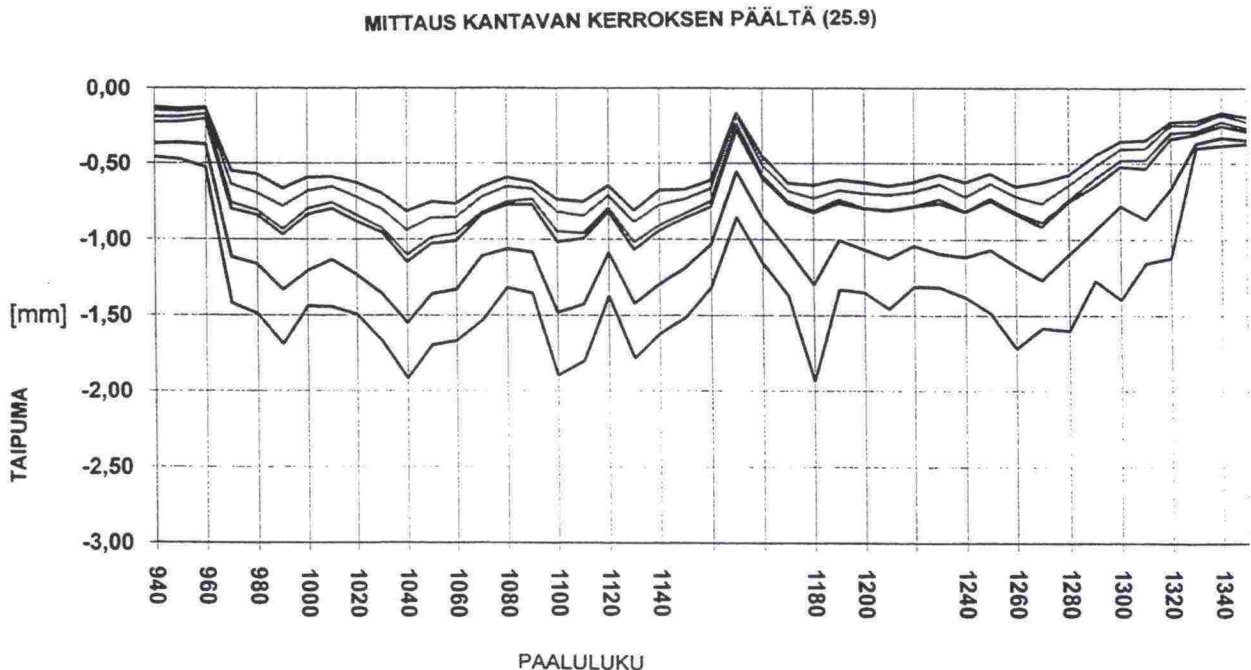
Liitteissä 6 ja 7 on esitetty koekohteen taipumasuppiloiden kuvaajat kantaan kerroksen (25.9, liite n) ja päällysteen päältä (23.10, liite n) tehdyistä mittauksista. Kuvissa on mukana mitatut suppilot (siniset käyrät) paaluväliltä 1050-1150 (ei teräsverkkoa). Vihreä käyrä on ns. edustava taipumasuppilo (mediaani). Molempiin kuviin on lisätty teoreettinen mitoitettua rakennetta kuvaava taipumasuppilo (punainen käyrä), joiden laskemiseksi käytetyt lähtötiedot näkyvät APAS-ohjelmalla tulostetusta mitoitusraportista (liite 2). Kuvassa on lisäksi mittaustuloksiin sovitettu taipumasuppilo, jonka määrittämi-

sellä on saatu arvioitua mahdollisesti rakenteessa toteutuvia kantavuusmoduuleja (taulukot 5 ja 6).

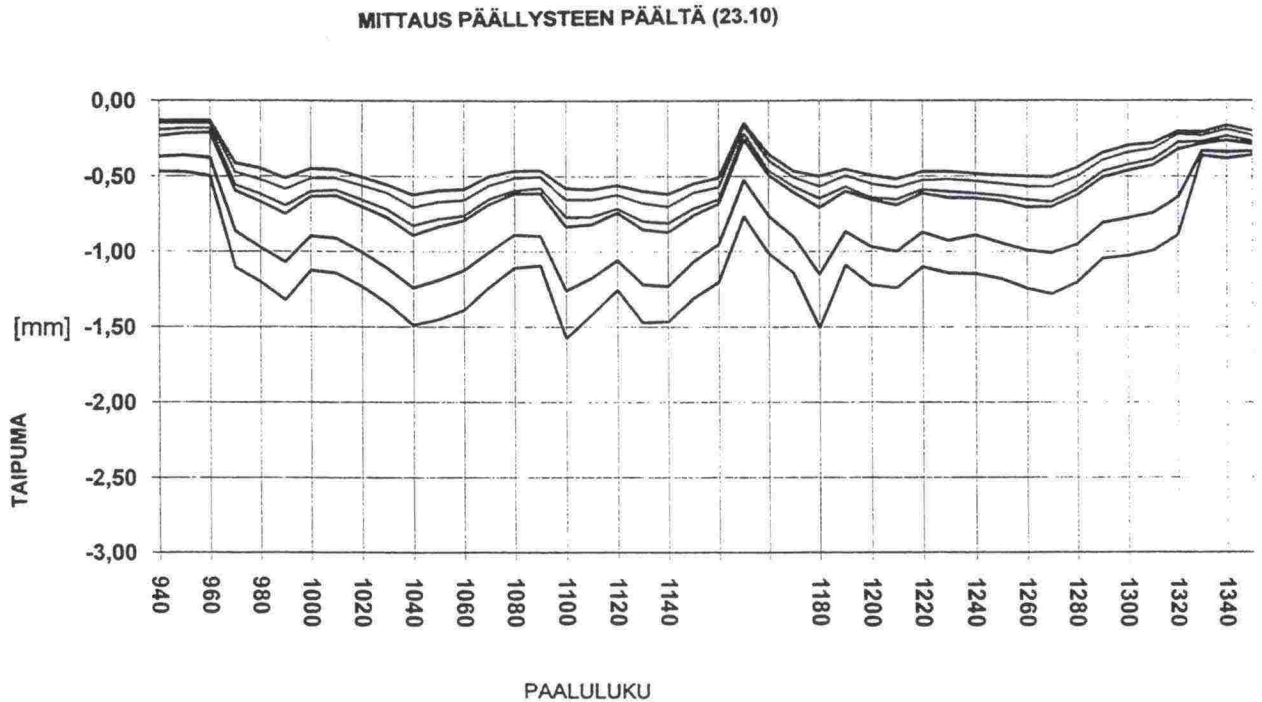
Taipumasuppiloilla on melko jyrkkä muoto. Rakenne antaa periksi suhteellisen paljon kuormituksen alla, mutta taipumat kauempänä kuormituksesta eivät ole kovin suuria. Taipuma pienenee jyrkästi 45 cm etäisyydelle kuormituslevyn keskipisteestä, joten kantavan kerroksen ja jakavan kerroksen yläosa mahdollisesti vaikuttaa rakenteen jäykistämiseen merkittävästi. Kantavan kerroksen päältä tehdyissä mittauksissa kuvaaja on jyrkempi ja käyrässä on enemmän taitepisteitä D20 ja D45 kohdalla.

Kantavuuden kehittyminen päällystämisen johdosta nähdään maksimitaipuman arvosta, joka on kantavan kerroksen päältä noin 1,9 mm ja päällysteen päältä 1,5 mm. Verrattaessa mitattuja taipumasuppilo-kuvaajia mitoitettuun teoreettisen rakenteen kuvaajaan havaitaan koerakenteen käyttäytyvän eri tavalla kuin arvioitiin ja suunniteltiin. Teoreettisen käyrän muoto ei ole niin jyrkkä. Mitoitetun käyrän maksimitaipuman suureen arvoon vaikuttaa eniten pohjamaalle annettu pieni kantavuus, vaikka muuten kerrosten moduulit ovat rengasrouhetta lukuunottamatta suurempia kuin sovitetussa taipumasuppilossa (luku 5.1.2.4).

Kuvissa 16 ja 17 on lisäksi esitetty koko tieosuuden taipumat kaikilta geofoneilta sekä kantavan kerroksen että päällysteen päältä tehdyissä mittauksissa. Alin käyrä kuvaa kuormituslevyn keskipisteen alta mitattuja taipumia ja ylin puolestaan geofonilta D120 mitattuja arvoja.



Kuva 16. Koko tieosuuden (plv 940-1340) mitatut taipumat kaikilta geofoneilta.
Mittaus kantavan kerroksen päältä (25.9).



Kuva 17. Koko tieosuuden (plv 940-1340) mitatut taipumat kaikilta geofoneilta.
Mittaus päällysteen päältä (23.10).

Kuvista nähdään selvästi vanhan asfaltin raja sekä rumpu (PL 1160) selvästi muuta rakennetta kovempina kohtina (pienet taipumat). Taipumissa kanta-
van kerroksen päältä on selvästi suurempia vaihteluita kuin päällysteen
päältä tehdyissä mittauksissa. Kuvasta nähdään myös uloimpien geofonien
taipumien olevan suhteellisen tasaisia. Lisäksi kuvan 17 perusteella voidaan
päättellä teräsverkon tasoittavan maksimitaipumaa paaluvälillä 1190-1300.
Selvästi heikoimmat kohdat koeosuudella sattuvat paaluille 1040, 1100 ja
1180. Näillä paaluilla mittaukset on tehty oikealta kaistalta ja paaluilla 1100
ja 1180 potentiometriä asennusten takia rakenteen tiiviys on huonompi.

Pudotuspainolaitteen nopea ja dynaaminen kuormitus vastaa hyvin liikenne-
kuormitusta ja sillä saadut taipumasuppilot kertovat paremmin tierakenteen
käyttäytymisestä. Menetelmän käyttöön ollaankin tulevaisuudessa siirtymäs-
sä kaikissa teiden inventointi- ja laadunvalvontamittauksissa.

5.1.2.4. E-moduulin takaisinlaskenta APAS-ohjelmalla

APAS-ohjelmalla voidaan arvioida rakenteessa toteutuvia kerrosten E-mo-
duuleja analysoimalla pudotuspainolaitteella suoritettuja mittaustuloksia. Oh-
jelmalla yritetään hakea vaihtelemalla kerrosten laskentaparametrien arvoja
taipumasuppilon kuvaaja, joka parhaiten vastaa mittaustuloksia muodoltaan.

Liitteiden 6 ja 7 kuvissa on esitetty Ilola-Sannainen koekohteen mittaustulok-
siin sovitettu taipumasuppilo (punainen käyrä). Seuraavissa taulukoissa (5 ja
6) on esitetty "takaisinlaskennalla" eri rakennekerroksille saadut materiaali-
parametrit.

Taulukko 5. E-moduulin takaisinlaskenta kantavan kerroksen päältä (25.9) tehdyistä pudotuspainomittauksista (liite n).

Materiaalikerros	Jäykkyysmoduuli E [MPa]	Poissonin vakio ν	Kerroksen paksuus d [cm]
KaM	E= 240 MPa	0,35	30
Sr	E= 180 MPa	- " -	80
RR2	E= 2 MPa	- " -	100
Pohjamaa	E= 40 MPa	-	-

Taulukko 6. E-moduulin takaisinlaskenta päällysteen päältä (23.10) tehdyistä pudotuspainomittauksista (liite n).

Materiaalikerros	Jäykkyysmoduuli E [MPa]	Poissonin vakio ν	Kerroksen paksuus d [cm]
PAB-V	E= 1500 MPa	0,35	6
KaM	E= 200 MPa	- " -	30
Sr	E= 160 MPa	- " -	80
RR2	E= 2 MPa	- " -	100
Pohjamaa	E= 40 MPa	-	-

Takaisinlaskennassa rengasrouheelle kokeiltiin arvoja väliltä 1-2 MPa. Rengasrouheen ja pohjamaan moduulien muokkaaminen vaikuttivat eniten käyrän sovituksessa maksimitaipumaan. Päällysrakenteen moduulien muuttaminen vaikuttivat puolestaan enemmän taipumasuppilon muodon sovittamiseen. Rengasrouheelle takaisinlaskennassa annetulla Poissonin vakion arvolla eikä rengasrouhekerroksen paksuuden vaihtelulla (laskelmissa arvoja 0,5-1,5 m väliltä) ollut merkittävää vaikutusta taipumakäyrän sovituksessa.

Molemmissa tapauksissa pohjamaalle (S_a) on jouduttu antamaan 40 MPa:n kantavuus, jotta käyrä on saatu sovittettua lähelle mittaustuloksia. Tämä saattaa olla oikea arvio tilanteesta, sillä suunnitelmasta poiketen kuivakuorta ei jouduttu kaivamaan pois juuri lainkaan. Mittausten aikana vallitsivat kuivat olosuhteet, joten pohjamaan luonnollinen kantavuus on huomattavasti suurempi kuin mitä mitoituksessa käytetty kevätkantavuus ($E=5$ MPa). Takaisinlaskennalla sitomattomille rakennemateriaaleille tuli yllättävän pienet moduulit, vaikka Koskenkylän murskeella ollaan saavutettu normaalikohteissa erittäin suuria kantavuuksia. Kiviaineksen ja rengasrouheen välinen moduuliero on sen verran suuri, että se voi sekoittaa laskelmia ja analyttisen menetelmän soveltuvuus tällaiselle rakenteelle voidaan asettaa kyseenalaiseksi.

5.1.3. Levykuormitus- ja pudotuspainokokeen tulosten vertailu

Taulukossa 7 on esitetty toisiaan vastaavat kantavuusmittaustulokset molemmilla menetelmillä kantavan kerroksen päältä. Taulukkoon on kerätty tiedot keskiarvoina kahdelta eri paaluväliltä (rumpua ei huomioitu), joista voidaan arvioida mahdollista teräsverkon vaikutusta kantavuuteen.

Taulukko 7. Levykuormitus- ja pudotuspainokokeiden tulosten vertailua. Mittaus kantavan kerroksen päältä (25.9).

Mitattu paaluväli		E2-mittaustulokset [MN/m ²] kantavan kerroksen päältä (25.9)	
		Levykuormitus	Pudotuspaino
plv 970-1320 (koko osuus)	pienin	89	72
	suurin	162	123
	keskiarvo	112,8	94,8
plv 970-1155	pienin	89	72
	suurin	155	105
	keskiarvo	114,5	89,3
plv 1165-1320 (teräsverkko)	pienin	108	72
	suurin	162	123
	keskiarvo	124,6	100,4

Normaalirakenteisilla teillä dynaamisella pudotuspainolaitteella saadaan yleensä parempia kantavuuksia kuin levykuormituskokeella. Koetiellä mittaustulokset olivat kuitenkin päinvastoin. Levykuormituskantavuudet ovat keskimäärin noin 20 MN/m² suurempia. Tämä johtuu mahdollisesti laitteiden erilaisesta kuormitustavasta, levykuormituskokeessa kuormitus on staattista ja hitaampaa kun pudotuspainolaitteella kuorma pudotetaan dynaamisesti ja nopeasti rakenteen pinnalle. Yleensä staattinen ja dynaaminen E₂ vastaavat parhaiten toisiaan (ero pienin), kun mitattavan tien kantavuus on välillä 150-200 MN/m². Vanhan asfaltin päältä pudotuspainolaitteella saatiin kuitenkin levykuormitusta suuremmat kantavuusarvot.

Mahdollinen teräsverkon kantavuutta lisäävä vaikutus nähdään molempien menetelmien mittautuloksista. Kantavuus on noin 10 MN/m² suurempi teräsverkollisella osuudella.

5.2. Painuma- ja siirtymämittaukset

5.2.1. Potentiometrit

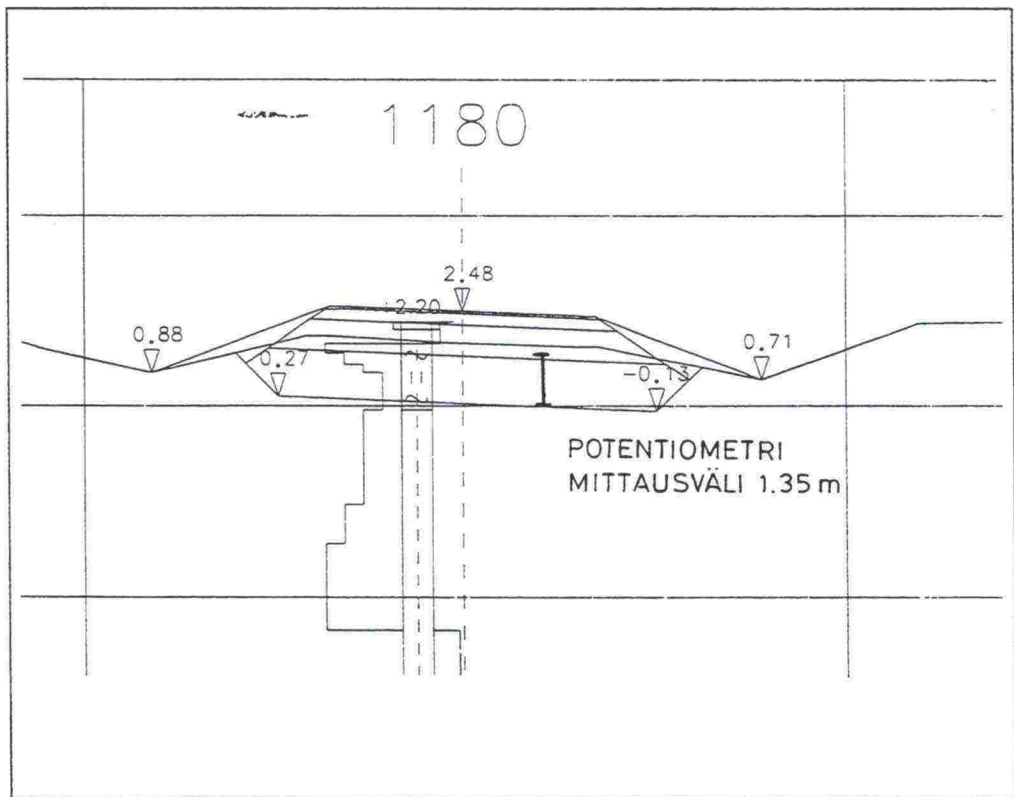
Ilola-Sannainen koekohteeseen asennettiin 2 potentiometriä (PI 1100 ja 1180) rengasrouhekerroksen kokoonpuristuvuuden arvioimiseksi. Laitteella mitataan teräsvaijerilla toisiinsa yhdistetyn mittalaitteen (potentiometri) ja "ankkurin" välistä siirtymää voltteina, jotka muunnetaan varsinaisiksi siirtymäyksiköiksi (1 mV \approx 4 mm). Joustavalla letkulla suojattu teräsvaijeri liittyy mekaanisesti koteloituun lineaariseen monikierrospotentiometriin toisesta päästään. Teräsvaijerin pitää kireänä potentiometrin yhteyteen asennettu kierrejousi. Ankkurina toimii suora nelikulmainen teräslevy.

Potentiometriä asentaminen suoritettiin rakentamisen aikana. Rengasrouhekeerosta rakennettaessa potentiometrejä varten jätettiin muoviset suoja-putket (ϕ 200mm). Jakavan kerroksen rakentamisen aikana potentiometrit asennettiin suojaputkiin siten, että ala-ankkurit sijoitettiin suodatinkankaan päälle. Mittavaijereita suojaputkineen pidettiin pystysuorassa asennossa ja rengasrouhetta kaadettiin suojaputkiin ja tiivistettiin lapiolla ja käsin. Suoja-putket nostettiin ylös ja ja yläankkurit, jossa mittalaitteet sijaitsevat asennet-

tiin noin 100 mm RR-kerroksen yläpuolelle jakavaan kerrokseen. Suojaputkien takia suodatinkankaassa olleet aukot paikattiin uusilla kankaan palasilla. Potentiometrin kohdalla jakavan ja kantavan kerroksen tiivistäminen tehtiin tärylevyllä. Rakentamistavasta johtuen RR-kerroksen ja jakavan kerroksen tiiveydet jäivät muuta rakennetta hieman huonommaksi. Potentiometrien mittaushohdot vedettiin suojattuina sivuojan takaluiskaan ja asennettiin tien sivulle laitettuun mittaustolppaan (autonlämmittimen pistorasiatolppa).

Ensimmäiset mittaukset otettiin heti, kun potentiometri oli asennettu ja sen jälkeen, kun kantava kerros oli tiivistetty ennen päällystämistä. Ensimmäisten asennuksen jälkeen otettujen mittaustulosten perusteella todettiin, että potentiometrien teräsvaijereille ei oltu jätetty tarpeeksi venymisvaraa. Tämän johdosta ne jouduttiin 19.9. kaivamaan auki ja teräsvaijereille asennettiin lisää venymävaraa, jolloin mittaustulokset ovat luotettavia

Kuvassa 18 on esitetty potentiometrin sijainti suunnitelmakuvassa (poikkileikkaus paalulta 1180).



Kuva 18. Suunnitelmakuva potentiometristä poikkileikkauksessa PI 1180.

Taulukkoon 8 on kerätty tähän mennessä kertyneet mittaustulokset, joiden perusteella RR-kerros on kokoonpuristunut paalulla 1100 yhteensä 16,3 cm verran ja 14,1 cm paalulla 1180. Paalun 1180 tulos on mahdollisesti luotettavaampi, koska siinä kohdalla teräsvaijeri todennäköisesti ei päässyt venymään aivan ääriasentoonsa ennen uudelleen asennusta.

Taulukko 8. Koekohteen potentiometrimittaustulokset paaluilta 1100 ja 1180.

Mittaus pvm	Mittalukema [V]		Vastaa siirtymää [cm / %]		Huomioitavaa
	PL 1100	PL 1180	PL 1100	PL 1180	
8.9	0,805	0,731	-	-	heti asennuksen jälkeen (kalibroitu)
13.9	0,205	0,209	15	13,1	kantava kerros ajettu ja tiivistetty päättös uudelleen asennuksesta
19.9	0,249	0,209	13,9	13,1	rakenne kaivettiin auki
	0,748	0,644	-12,5	-10,9	nosto (ero ed.)
	0,607	0,589	3,5	1,4	uudet rakennekerrokset päälle tiivistettynä (uudet kalib.arvot)
12.12	0,556	0,551	1,3	1	3 kk rakentamisesta
Kokoonpuristuminen			16,3 cm (12,4%) 14,1cm (10 %)		

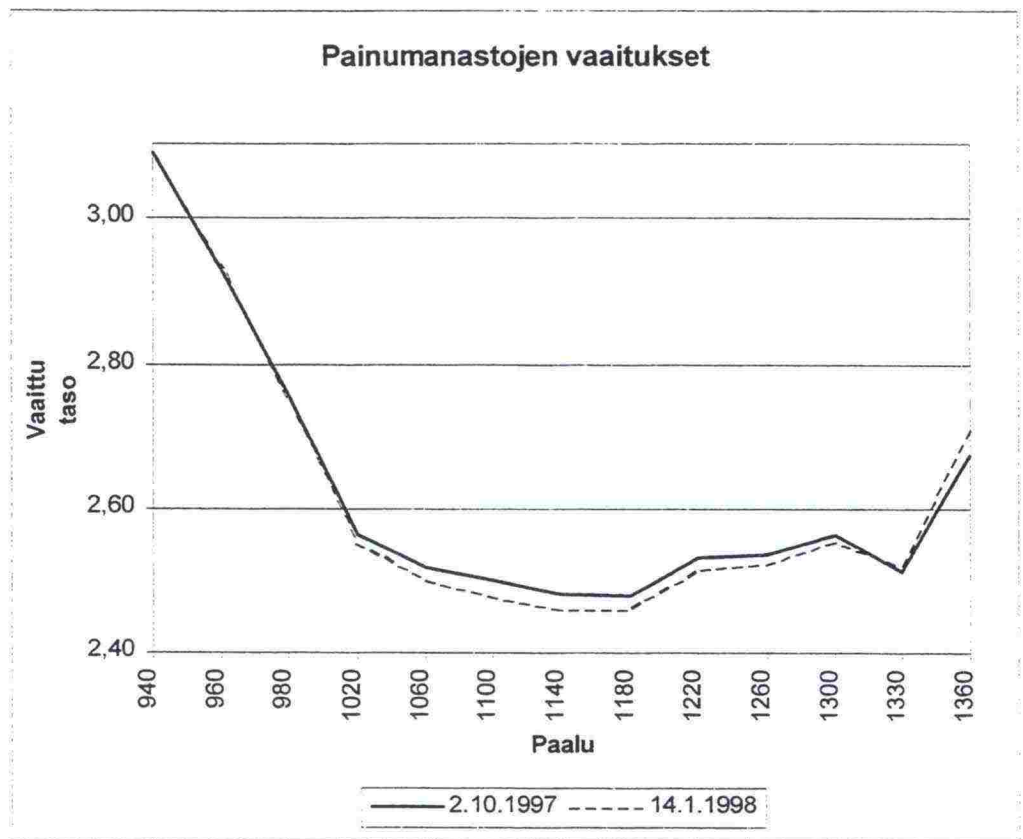
Rengasrouhepinnan vaaitustulosten perusteella RR-kerroksen toteutuneet paksuudet olivat 1,31 m (PL 1100) ja 1,4 m (PL 1180) ennen päällysrakenteen tiivistävää vaikutusta. Kokoonpuristuminen on näiden tulosten perusteella 12,4 % ja 10 % (PL 1100 / 1180) eli samaa luokkaa kuin esiselvityksen perusteella arvioitu kokoonpuristuma (10-15%). Päällystämisen ja noin 3 kuukauden liikenteen aiheuttama kokoonpuristuma on 1-1,3 cm, joka noin 1 % RR-kerrosten paksuudesta.

5.2.2. Painumanastat

Koetien kokonaispainumaa tarkkaillaan tienpinnan vaaituksilla. Koekohteen päällystäminen tehtiin perjantaina 26.9., jonka jälkeen 2.10. varsinaiset siirtymänastat asennettiin tien keskiviivalle ja reunaviivoille 40 metrin välein ja suoritettiin ensimmäinen valmiin tierakenteen vaaitusmittaus. Tienpinta vaaittiin myöhemmin siirtymänastojen lisäksi myös 10 metrin välein asfaltinpinnasta. Siirtymien tarkkailua on tarkoitus jatkaa liitteen n aikataulun mukaisesti.

Liitteen 8 taulukkoon on kerätty yhteenvedona tulokset nastojen kohdilta mitatuista tasoista. Pystysuoritymät on laskettu taulukkoon mittauskertojen välisenä erotuksena, jotta nähdään kuinka painuma on kehittynyt mittausten välissä. Positiivinen arvo tarkoittaa siirtymää ylöspäin, negatiivinen arvo painumaa. Viimeisessä sarakkeeseessa on esitetty yhteenlaskettu tierakenteen kokonaispainuma, mikä on kehittynyt rakentamisen jälkeen 2.10 -14.1. välisenä aikana (n. 2,5 kk). Kuvassa 19 on lisäksi esitetty käyrinä keskilinjan kohdalta mitatut tasot ensimmäiseltä ja viimeiseltä vaaituskerralta. Käyrien välinen erotus kuvaa painuman suuruutta 3,5 kuukauden ajalta.

Liitteen 8 taulukosta ja kuvasta 19 nähdään suurimmat painumat (18-27 mm) ovat kehittyneet paaluvälillä noin Plv 1060-1220 (rengasrouhekerros paksuin). Tällä koetien keskiosuudella painuma on kehittynyt myös selvästi enemmän kahden viimeisen mittauskerran välillä. Koeosuuden alussa ja lopussa (pl 980, 1260, 1300) mittauksen 6.11 perusteella tapahtunut pientä ylöspäin suuntautuvaa siirtymää, mikä voi mahdollisesti johtua ylirajoitetusta kevennysvaikutuksesta. Routa on saattanut aiheuttaa ylöspäin suuntautuvaa siirtymää, mikä voidaan havaita 14.1 mittauskerran tuloksista vanhan rakenteen päältä tehtyjen mittausten perusteella (pl 960, 1300,1360) ja kuvasta 19.



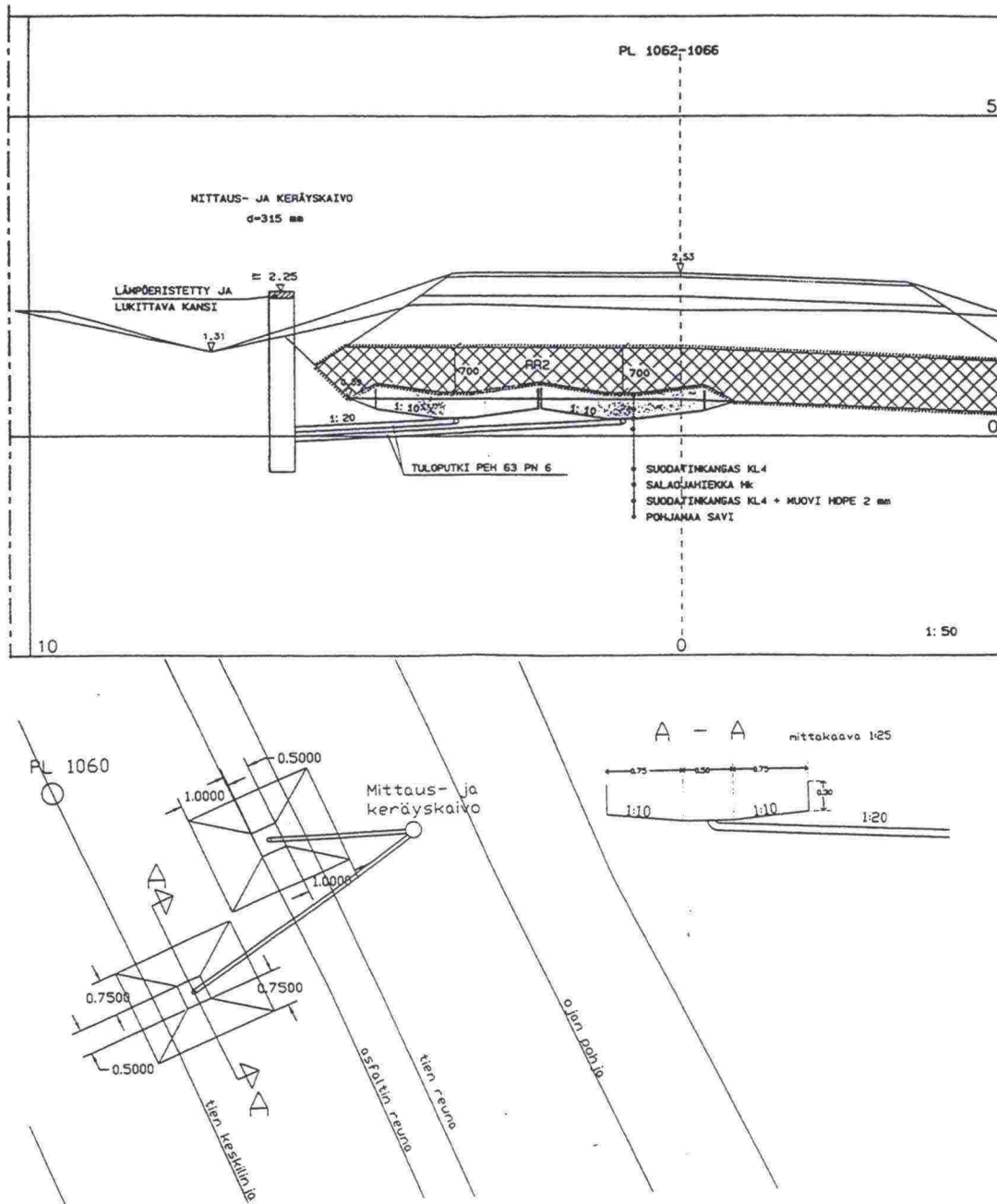
Kuva 19. Koekohteen vaaitut tasot keskilinjalla painumanastojen kohdalla. Ensimmäinen ja viimeinen mittauskerta.

5.3 Ympäristövaikutukset

5.3.1 Pohjavesiputki ja lysimetrit

Rengasrouheen ympäristöominaisuuksien arvioimista varten kohteeseen asennettiin pohjavesiputki paalulle 1060 sivuojan taakse noin 7-10 metrin etäisyydelle tierakenteesta. Pohjavesiputken siiviläosa on noin 10 metriä paksun savikerroksen alapuolisessa karkeassa maakerroksessa. Pv-putken lisäksi RR-kerroksen alapintaan kohtaan PL 1065 rakennettiin kaksi 5 mm:n muovilevystä tehtyä lysimetriä (# 2 x 2,5 m²) (kuva 20). Molempien lysimetrien pohjalta lähtee tuloputki, PEH 63 PN 6, jota pitkin rengasrouhekerroksen läpi virtaava vesi kerääntyy yhteen mittaus- ja keräyskaivoon.

Lysimetrit rakennettiin hieman ennen muuta tierakennetta kaivetun ja tasatun pohjan päälle. Lysimetrien päälle rakenettu 0,4 m paksu salaojahiekka tiivistettiin tärylevyllä, jonka jälkeen rengasrouherakennetta alettiin rakentaa. Asentamisessa ei ollut vaikeuksia. Alunperin lysimetrit oli suunniteltu rakennettavaksi ohuemmasta (2 mm) muovikalvosta, mutta mahdollisten asennusongelmien välttämiseksi päätettiin käyttää paksumpaa 5 mm:n "muovilevyä". Vedenkeräysaltaat vietiin rakennuspaikalle valmiiksi tehtyinä.



Kuva 20. Suunnitelmakuva paalulle PL 1065 asennetuista lysimetreistä.

Pohjavesiputkesta otettiin ensimmäinen vesinäyte (0-näyte) ennen rakentamisen aloittamista elokuussa. Seuraavat vesinäytteet pohjavesiputkesta ja RR-kerroksen alle rakennetusta lysimetrikaivosta otettiin noin 2 kk rakentamisen jälkeen marraskuussa -97. Lysimetrikaivosta näyte otettiin läheltä kaivon pohjaa. Näytteiden vesi oli kirkasta ja pinnassa oli ohut kalvo.

Vesinäytteiden ottamisen jälkeen joulukuussa mitattiin pv-putkesta pohjavedenpinta, joka oli tuolloin tasolla -0,69. Rengasrouheen alapinnan taso on alimmillaan -0,28 paalulla 1160. Rakentamisen aikana elo-syyskuussa havainnointiin pohjaveden nousevan vain muutamalla kohdalla yli kaivutason. Kaivossa veden pinta oli mittaushetkellä tasolla +0,86, kun pohja on syvyydellä -0,15 eli kaivoon noin 2,5 kuukaudessa kertynyt vesimäärä oli yhteensä noin 80 litraa (0,08 m³).

5.3.2 Kemialliset analyysit koekohteen vesinäytteistä

Esiselvityksen ja ennakkoon tehtyjen VTT:n liukoisuustestien perusteella tehtiin arvio, mitä kemiallisia analyyseja koekohteesta otettaville vesinäytteille on järkevää tehdä. Taulukossa 9 on esitetty ensimmäiset tulokset pohjavesiputkesta ja lysimetrikaivosta marraskuussa -97 otetuista näytteistä metallipitoisuuksien osalta. Kaikki koekohteen kemialliset määritykset on tehty Helsingin kaupungin ympäristölaboratoriossa. Näytteistä analysoitiin lisäksi pH-arvo, sähkönjohtavuus, Redox-potentiaali sekä sulfaatti-arvo SO_4 . Metallipitoisuudet määritettiin typpihapolla happamaksi tehdystä näytteestä pitoisuudesta riippuen grafiittiuuni- tai liekkitekniikalla.

Metallien lisäksi näytteistä analysoitiin polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH-yhdisteet), joiden tulokset on liitteessä 9. Hiilivetyjen määityksessä vesinäyte uutettiin dikloorimetaanilla ja analysointi tehtiin kaasukromatografi-ajosta massaspektrometrisesti. Samassa liitteen taulukossa on VTT:n ravistelutesteissä määritetyt PAH-pitoisuudet, joihin verrattuna koekohteen pitoisuudet ovat hyvin pieniä.

Taulukko 9. Tuloksia koekohteen vesinäytteiden ensimmäisistä kemiallisista analyyseista (pohjavesiputki ja lysimetrit).

Tutkimuksen kohde	Yksikkö	Koekohteen analyysit - H:gin kaupungin Ympäristölaboratorio				
		pohjavesiputki			lysimetri	
		elokuu-97 (0-näyte)	marrask.-97 näyte 1	näyte 2	marrask.-97 näyte 1	näyte 2
metallit						
Kromi, Cr	mg/l	0,003	0,006	0,003	0,005	0,005
Kupari, Cu	mg/l	0,022	0,057	0,03	0,044	0,031
Sinkki, Zn	mg/l	0,08	0,44	0,22	0,12	0,068
Lyijy, Pb	mg/l	0,084	0,058	0,031	<0,001	<0,001
Mangaani, Mn	mg/l	0,044	0,33	0,71	1,2	1,2
Rauta, Fe	mg/l	1,4	2,2	2,2	0,23	0,22
Muut						
Sulfaatti, SO_4	mg/l	26,9	22	17	370	380
pH	-	7,06	7,29	7,32	7,5	7,4
Sähkönjohtavuus	mS/m	23,4	72,7	160	152	152
Redox-potentiaali	mV	310	280	174	222	223

Vesinäytteiden pH-arvo on 7-7,5, joten olosuhteet ovat neutraalit. Taulukon tuloksista voidaan päätellä, että pohjaveden pitoisuudet lyijyn ja raudan osalta ovat jo alunperin melko korkealla. Tieosuudella ei ole tehty pohjaveden suojausta ja vt 7:n liikenteen päästöt ovat pitkään vaikuttaneet pohjaveden laatuun. Kromin ja kuparin pitoisuudet ovat pv-putken ja lysimetrin näytteissä samaa luokkaa. Mangaanin arvo on lysimetrissä selvästi suurempi. Lysimetrituloksista sulfaatti-arvo on erittäin korkea, mikä voi johtua orgaanisesta aineksesta eli humuksesta. Sitä on voinut kulkeutua kaivon luiskatäytteen läpi suodattuneesta vedestä tai jakavaan kerrokseen käytetystä vanhasta materiaalista. Jos vertailee koekohteiden sähkönjohtavuuden arvoa esim. vesilaitoksen raakaveden arvoon noin 14 mS/m (yläraja 50), on koekohteen arvot selvästi suuremmat. Eli mitä "likaisempaa" vettä sen sähköä johtavampaa se on.

Vesianalyysien tuloksista voidaan yleisesti sanoa, että pitoisuudet ovat melko pieniä. Lysimetrikaivoon kertynyt vesimäärä oli vielä melko pieni, joten rengasrouhepalaset eivät ole huuhtoutuneet vedellä kovin paljon. Liukenevista saattaa tapahtua enemmän sadekauden aikana keväällä. Talvella jäätyneen päällysrakenteen läpi ei mahdollisesti kulkeudu paljon vettä lysimetreihin.

Yllättävää oli pohjaveden suuret pitoisuudet verrattuna lysimetrin vesinäytteisiin. Vasta pidempiaikaisella lysimetriin kertyvän veden laadun seurannalla voidaan arvioida kunnolla rengasrouheen ympäristövaikutuksia. Luvussa 6.5 on esitetty koekohteen pitoisuuksien vertailu muihin tutkimustuloksiin (ulko-maiset koekohteet, VTT:n testi) sekä yleisiin vesistöjen taustapitoisuuksiin. Siellä on myös analysoitu hiukan lisää rengasrouhe-materiaalin liukenevuutta.

6 KOKEMUKSET RAKENTAMISESTA JA SEURANTAMITTAUSTEN ANALYYSINTI

6.1 Rakentamisen aikaiset havainnot

Ilola-Sannainen koeosuuden rakentaminen rengasrouheella RR2 sujui hyvin ja kokemukset materiaalin soveltumisesta tierakenteisiin olivat erittäin positiivisia. Rakentajat pitivät kohdetta erittäin haastavana ja mielenkiintoisena.

Tärkeimmät koekohteen rakentamisen aikaiset havainnot ja kokemukset koskien työmenetelmiä ja -koneita, työvaiheita ja yleisesti materiaalin soveltumista tierakentamiseen, jotka palvelevat myös tulevien kohteiden suunnittelua ja rakentamista ovat yhteenvedon omaisesti seuraavanlaisia:

TYÖKONEET & TYÖMENETELMÄT

- isompi puskukone olisi tehokkaampi materiaalin levityksessä ja tiivistyksessä
- puskukoneseen voisi asentaa sivulevyt, joilla levitysmatkaa voisi pidentää entisestään
- tulevilla kohteilla voisi kokeilla kaatopaikoilla yleisesti käytettävää sorkkajyrää tiivistystyöhön
- tukipenkereiden ajo RR-kerroksen sivuille ennen päällysrakenteen rakentamista
- jyräys mahdollista vasta, kun päällysrakennetta tehty 0,7 m paksu kerros
- kippauksessa ei tarvittu lavojen vesikastelua
- työkonien renkaita täytyy varoa rengasrouheen terästen takia

INSTRUMENTOINTI

- RR-pinnan vaaituksissa apuna puinen lankku (tarkempi mittaus)
- tasojen mittauksessa mittatikkuja siirrettävä tiheään rakenteen nopean painumisen vuoksi
- potentiometrien asennuksessa jätettävä vajereihin tarpeeksi venymisvaraa
- lysimetrit kannattaa rakentaa paksummasta muovilevystä ja tuoda paikalle valmiina
- kantavuusmittauksia ei kannata ohjelmoida otettavaksi potentiometrien kohdilta

TIERAKENTEEN MATERIAALIT

- RR-materiaalin työstettävyyttä ja muotoilu helppoa
- RR-materiaalin joukossa oli yllättävän paljon irtonaisina isoja ja paksuja teräslangan pätkiä
- rengasrouheen toimitukset kriittisiä aikataulullisesti varsinkin isoissa kohteissa
- suodatinkankaana voisi käyttää KL 2 kankaita
- päällysteenä kannattaa käyttää pehmeitä päällysteitä, jotka kestävät suurempia muodonmuutoksia

6.2 Koerakenteen kantavuus

Rengasrouheella rakennetun koetien kantavuuden tutkiminen ja analysoiminen on tärkeimpiä osa-alueita selvitetessä materiaalin soveltumista tierakenteisiin. Koerakentamisen ja rakenteen seurannan tavoitteita on saada selville suunnitteluperusteet rengasrouheella kevennettävän tien oikean päällysrakenteen (paksuus, materiaalit, päällyste) arvioimiseksi. Tavoitteena on seurannan ja tulevien kantavuusmittausten perusteella saada selville rakenteen kestävyys pitkällä aikavälillä liikennekuormia vastaan niin, että muodonmuutokset eivät muodostu rakenteessa liian suuriksi. Tutkimusten ja pittempiaikaisen seurannan perusteella voidaan asettaa tavoitekantavuus "rengasrouhe"-teille.

Ilola-Sannainen koetien kantavuutta ja kuormituskestävyyttä on arvioitu suoraan mitattujen kantavuusarvojen (E_2) ja pudotuspainolaitteella mitattujen taipumien perusteella. E_2 -arvojen avulla voidaan mahdollisesti määrittellä tavoitekantavuus, muuten arvot eivät paljon kerro rakenteen käyttäytymisestä liikennekuormituksen alla. Taipumasuppiloiden avulla saadaan enemmän

selville koko rakenteen ominaisuuksista. Kaikki kantavuusmittaustulokset on esitetty luvussa 5.1 ja liitteissä 5-7.

6.2.1 E_2 -kantavuusarvojen analysointi

Koetiltä mitattujen normaalia pienempien E_2 -kantavuusarvojen perusteella (luku 5.1) voidaan koetien kuormituskestävyydestä todeta yhteenvetona seuraavaa:

- mitatut E_2 -arvot melko pieniä "teoreettiseen" tavoitteeseen nähden (kantavan kerroksen päältä n. 90-100 MPa)
- asfaltoinnin (PAB-V1500) vaikutus kantavuuteen ei ollut vielä kovin suuri (15 MPa)
- teräsverkko jakavassa kerroksessa (plv 1165-1320) lisäsi rakenteen kantavuutta keskimäärin noin 10 MPa:n verran
- rengasrouheen jousto ja kimmoisuus näkyi parhaiten E_2/E_1 arvosta
- levykuormituskokeella saatiin 20 MPa suurempia kantavuuksia kuin pudotuspainolaitteella
- E_2 -arvot koeosuuden alkua ja loppuosuuksilla samaa luokkaa verrattuna keskiosuudella mitattuihin arvoihin, joten RR-kerroksen paksuudella ei vaikutusta (mikä havaittiin myös laskelmilla)

Normaalisti liikenteen kuormitus tiivistää tierakennettä ajan kuluessa ja rakenteen paras kantavuus saavutetaan vasta myöhemmin. Uuden pehmeän päällysteen moduuli kasvaa tulevaisuudessa sideaineen viskositeetin kanssa. Asfaltin ja rengasrouheen tiivistymisen vaikutusta kantavuuden kehitykseen pyritäänkin saamaan selville tulevilla koetien kantavuusmittauksilla (kevät-kesä 98).

Rengasrouherakenteelta (kimmainen rakenne) ei välttämättä tarvitse vaatia yhtä suuria kantavuuksia mitä normaalirakenteiselta tieltä. Koerakenteen kestävyys seurannan perusteella voidaan tulevaisuudessa arvioida riittävätkö noin 100 MPa:n kantavuudet kantavan kerroksen päältä päällysrakenneluokan 4AB...5AB teillä.

Tierakenteen kantavuuteen vaikuttaa eniten päällysrakennekerrosten paksuus ja tiiviys. Kantavuuden analysointia voidaan koekohteessa suorittaa myös vertailemalla E_2 -arvoja ja kohteessa toteutuneita RR-kerroksen ja päällysrakenteen paksuuksia. Taulukossa 10 on esitetty vertailua koekohteessa toteutuneiden kerrospaksuuksien ja molemmilla laitteella tehtyjen kantavuusmittaustulosten välillä. Rengasrouhekerroksen paksuus rakenteessa on laskettu todellisen paksuuden (vaahtu pinta) mukaan niin, että kokoonpuristumista on huomioitu 15%. Ohuimmissa kohdissa (koeosuuden alussa ja lopussa) puristuminen olisi mahdollisesti hieman vähemmän.

Taulukosta 10 voidaan selvästi havaita paalulta 1040 mitattujen pienempien kantavuuksien johtuvan mahdollisesti ohuemmasta päällysrakenteesta (0,98 m). Pienemmät kantavuudet paaluilla 1100 ja 1180 johtuvat kohtiin asennetuista potentiometreistä (tiivistäminen huonompaa).

Taulukko 10. Koekohteen vaaittujen tasojen perusteella arvioidut toteutuneet kerros-
paksuudet ja vertailu kantavuusmittaustuloksiin.

Mitattu Paalu	Rengasrouhekerros		Päälysrakenne (jakava+kantava)		Koko tierakenteen paksuus		Kantavuusmittaukset	
	[m] vas	[m] oik	[m] vas	[m] oik	[m] vas	[m] oik	Pudotuspaino [MPa] (kantava/päälyste) (25.9/30.9)	Levykuormitus [MPa] '(kantava) (25.9)
980	0,38	0,31	1,18	1,10	1,62	1,48	93 / 109	116
1000	0,40	0,47	1,16	1,04	1,62	1,57	96 / 116	141
1020	0,46	0,55	1,18	1,17	1,70	1,78	93 / 106	103
1040	0,71	0,77	0,99	0,98	1,76	1,82	72 / 88	89
1060	0,82	0,87	1,11	1,19	2,00	2,11	83 / 99	91
1080	0,88	0,97	1,16	1,21	2,10	2,24	105 / 121	134
1100	1,16	1,07	1,10	1,20	2,32	2,33	73 / 80	102
1120	1,21	1,20	1,09	1,17	2,36	2,42	101 / 110	113
1140	1,27	1,33	1,10	1,17	2,43	2,55	86 / 94	101
1160	rumpu		rumpu		rumpu		163 / 176	163
1180	1,16	1,22	1,23	1,19	2,44	2,48	72 / 85	127
1200	1,00	1,20	1,20	1,22	2,26	2,48	103 / 112	116
1220	0,88	1,05	1,16	1,22	2,11	2,33	106 / 120	111
1240	0,88	0,79	1,18	1,16	2,11	2,01	100 / 114	123
1260	0,67	0,65	1,22	1,12	1,96	1,82	81 / 107	111
1280	0,64	0,58	1,21	1,10	1,91	1,74	87 / 111	118
1300	0,43	0,26	1,14	1,13	1,63	1,46	99 / 126	108

6.2.2 Kantavuus taipumasuppiloiden perusteella

Pudotuspainolaitteella mitattujen taipumasuppiloiden perusteella voidaan paremmin analysoida koko tierakenteen käyttäytymistä kuormituksen alaisena. Suppilon muotoon vaikuttaa alusrakenteen ominaisuudet. Analysoitaessa taipumasuppilota voidaan jollakin tapaa olettaa, että taipumanmittausanturin etäisyys kuormituslevystä (=d) on sama kuin syvyys (=z) tierakenteen pinnasta. Tällöin esim. etäispainuma D120 kertoo tierakenteesta ikäänkuin syvyydelle 120 cm.

Ilola-Sannainen koekohteessa tehdyistä pudotuspainomittauksista on esitetty taipumasuppiloita tämän raportin liitteissä 6 ja 7. Näissä kuvaajissa (käyräparvi) on mittaustulokset vain paaluväliltä 1050-1150 (ennen rumpua). Kuvaajasta ei voida tarkkaan nähdä, miltä kohdalta koeosuutta mitattu käyrä on. Luvussa 5.1 on esitetty myös koko tieosuuden taipumat (kuvat 16 ja 17). Näiden taipumakuvaajista saatiin selville asioita, joiden perusteella voidaan koetien kantavuutta analysoida seuraavasti:

- mitoitettun teoreettisen ja mitatun todellisen rakenteen taipumasuppiloiden eroavaisuuden perusteella RR-rakenne ei käyttäydy normaalilla tavalla
- mitoitettun teoreettisen rakenteen selvästi suurempi maksimitaipuma, vaikka laskentaan käytetyt E-moduulit selvästi suurempia (kantavuus vs. taipuma-analogia)
- taipumasuppiloiden muoto on melko jyrkkä eli taipumat kuormituksen alla ovat melko suuria, mutta pienenevät jyrkästi kauempana kuormituksesta
- kriittisiä pisteitä taipumasuppiloissa on D20 ja D45, joissa tapahtuvat jyrkimmät muutokset taipuman suuruuden muutoksissa

- jyrkin muutos tapahtuu D45 kohdalla eli mahdollinen kriittinen kohta rakenteen kantavuuden kehityksen ja jäämäköitymisen kannalta (vrt.luku 4 rakentaminen -> päällysrakennetta rakennettu noin 70-80 cm)
- taipuman suuruus kauempana kuormituslevystä lähes samaa luokkaa (D45 -> D120)
- suurimmat maksimitaipumat mitattiin paaluilla 1040 (ohuin päällysrakenne), 1100 ja 1080 (potentiometrit)
- suurimmat kuormituslevyn alta (D0) mitatut taipumat olivat 1,9 mm (kantava kerros) ja 1,5 mm (päällyste)
- teräsverkon vaikutus (plv 1165-1320) nähdään selvästi tasaisempaa taipumakäyränä (kuvat 16,17)
- teräsverkko ei vaikuttanut taipumasuppilon muotoon (kuvaa ei ole esitetty raportissa), mutta taipuman suuruuteen oli verkolla pientä vaikutusta

Tulevilla kantavuusmittauksilla saadaan selville mahdolliset muutokset taipumakuvaajiin, joita voidaan sitten verrata mitattuihin E_2 -arvoihin. Tulevaisuudessa olisi järkevää laskea rengasrouhekohteita elementtimenetelmään perustuvilla ohjelmilla, joilla voisi paremmin laskea jännitysten jakautumista ja siirtymiä päällysrakenteessa.

6.3 Rengasrouhekerroksen kokoonpuristuminen

Rengasrouhe RR2 on kevyt ja kestävä materiaali, mutta kuormituksen alaisena se on erittäin kimmoisa. Muodonmuutokset ovat lähes palautuvia poistettaessa kuormitus rakenteen päältä. Tierakenteessa rengasrouhekerros puristuu päällysrakenteen painosta ja RR-palaset järjestäytyvät rakenteessa mahdollisimman tiiviisti. Jos päällysrakennetta ei olisi tarpeeksi paksulta tie "joustaisi" liikaa ja selvät ajourat jäisivät tien pintaan ja asfalttipäällyste vaurioituisi nopeasti.

Ulkomaisissa koekohteissa rengasrouheen kokoonpuristumisen suuruudeksi on mitattu noin 10-15 % kerrospaksuudesta. Rengasrouheen suurella kokoonpuristumisella on vaikutusta materiaalimenekkiin rakennuskohteissa sekä rakenteen kantavuuteen ja painumiseen.

Ilola-Sannainen koekohteeseen asennetuista potentiometreistä on kokoonpuristuvuutta mitattu kerran rakentamisen jälkeen (tulokset luvussa 5.2). Laitteiden uudelleen asennuksen vuoksi tulokset eivät ole täysin luotettavia, mutta tähän mennessä ainakin mitatut kokoonpuristumat paaluilla 1100 ja 1180 ovat järkeviä verrattuna ulkolaisiin tutkimuksiin.

Viimeisen mittauksen jälkeen kokonaiskokoonpuristuminen paalulla 1100 oli 12,4 % ja paalulla 1180 tulos oli 10 %. Heti kantavan kerroksen rakentamisen jälkeen (5 pv) otetun mittauksen perusteella RR-kerros oli puristunut 11,5% / 9,4 % (PL 1100/ 1180). Potentiometrimittauksia jatketaan ainakin 5 vuoden vuoden ajan ja mittauksia tehdään noin 2-4 krt/vuodessa. Tulevan seurannan avulla nähdään, kuinka kokoonpuristuminen hidastuu tai mahdollisesti loppuu kokonaan.

6.4 Koetien painuminen

Koekohteen keventäminen rengasrouheella suunniteltiin painuma- ja kanta-
vuuslaskelmien optimointitehtävänä. Lisäkuormitusta laskelmien perusteella
tuli noin 2 kPa koeosuuden keskelle ja päihin 0 kPa, joten painuman pitäisi
kehittyä eniten keskiosilla. Koekohteen kokonaispainuman seurannan perus-
teella voidaan tulevaisuudessa arvioida rengasrouheen kevennysvaikutusta.

Rengasrouheella kevennetyn koetien kokonaispainuma aiheutuu seuraavis-
ta tekijöistä:

- rengasrouheen kokoonpuristuminen
- päällysrakennekerrosten tiivistyminen
- pohjamaan konsolidaatiopainuma

Pohjamaan suurempi vaikutus painuman kehitykseen tulee luultavasti esille
vasta myöhemmin. Aluksi painuman kehityksessä on mahdollisesti määrää-
vämpiä RR-kerroksen ja päällysrakenteen tiivistyminen. Potentiometrimitta-
usten mukaan RR-kerros oli painunut noin 1 cm verran kolmen kuukauden
aikana.

Rakentamisen alussa vanhan rakenteen kaivun edistyessä huomattiin, että
vanha päällysrakenne olikin suunniteltua paksumpi. Tämän johdosta kuiva-
kuorta ei jouduttu kaivamaan juuri lainkaan pois. Pohjamaa on mahdollisesti
tiivistynyt penkereen alla luultua enemmän, joten kevennysvaikutus tulee
olemaan suurempi ja kehittyvien painumien pienempiä kuin laskelmilla on
ennakoitu.

Koetien vaaitusmittaustulokset on esitetty liitteessä 8, joiden mukaan suu-
rimmat 3,5 kuukauden aikana kehittyneet painumat ovat noin 18-27 mm
keskiosuudella (plv 1060-1220). Koeosuuden päissä siirtymiä on tapahtunut
jopa ylöspäin. Alimmillaan tasaus on tällä hetkellä paalulla 1180 (+ 2,272 oi-
kea reuna), kun arvioitu tulvakorkeus on +2,20. Keskilinjalta mitatut tasot
ovat kuitenkin reilusti yli tulvakorkeuden. Paalulla 1060 painumaan saattaa
vaikuttaa kohtaan asennetut lysimetrit. Tulosten perusteella ei voida kuiten-
kaan vielä arvioida kevennysvaikutusta. Siirtymämittauksia koetiellä tullaan
jatkamaan mahdollisesti 5 vuoden ajan.

6.5 Rengasrouheen ympäristövaikutukset

Rengasrouhe on rakennusmateriaalina uusi ja sen mahdollisia ympäristövai-
kutuksia ei tunneta vielä riittävästi. Jotta materiaalista voisi kehittyä maara-
kentamisessa yleisesti käytettävä tuote, on siitä mahdollisesti ympäristöön
liukenevia pitoisuuksia tutkittava koerakenteessa. Yhdysvalloissa tehtyjen
rengasrouheen ympäristöanalyysien avulla arvioitiin mahdollisia rengasrou-
heesta irtoavia aineita, joiden perusteella suunniteltiin Ilola-Sannainen koe-
kohteen vesinäytteistä tehtävät määritykset.

Ulkomaisia ympäristöanalyysseja oli tehty ns. "worst case" -kokeina, jotta
saatiin selville mahdollisesti rengasrouheesta liekeneviä suurimpia pitoisuuksia.
Näiden kokeiden perusteella oli päätelty suurimpien metalli-pitoisuuksien
esiintyvän tapauksissa, kun sijoitusolosuhteet ovat happamat (alhainen pH).
Orgaanisia aineita (hiilivedyt) irtosi rengasrouheesta sitä vastoin eniten
emäksisissä olosuhteissa. Tällaisten olosuhteiden toteutuminen Suomessa

on kuitenkin perin harvinaista. Yhdysvalloissa on monessa osavaltiossa tehty rajoituksia rengasrouheen sijoittamisesta siten, että RR-kerros ei saa olla kosketuksissa pohjavesipinnan kanssa.

Rengasrouheesta liukenevien aineiden pitoisuuksille ei ole minkäänlaisia raja-arvoja, joiden määrittäminen tulee varmaankin kyseeseen tulevaisuudessa koerakentamiskohteiden seurannan ja tutkimisen kautta projektin "sivutuotteet maa- ja tierakenteissa -käyttökelpoisuuden osoittaminen" (Ympäristögeotekniikka -ohjelma) tuloksena. Rengasrouheesta liekenevien pitoisuuksien arvostelemiseksi tulee myös analysoida materiaalin sijoitusolosuhteet, jotta voidaan määritellä mahdolliset olosuhteista tulevat pitoisuudet.

Seuraavissa taulukoissa 11-14 on esitetty Ilola-Sannainen ympäristöanalyysioien vertailua eri tutkimustuloksiin, jotta saadaan laajempi kuva rengasrouheesta liukenevien aineiden pitoisuuksista erilaisissa olosuhteissa. Koekohteen vertailua on suoritettu VTT:n liukoisuustestin, yleisten vesistöjen taustapitoisuuksien sekä ulkomaisten koekohteiden lysimetritulosten kanssa.

VTT:n Kemiantekniikan toimesta tehdyllä vesiravistelukokeella pyrittiin saamaan tietoa rengasrouheen mahdollisesti pitkäaikaisesta liukoisuudesta ja hyötykäyttökelpoisuuden arviointiin.

Taulukko 11. Ilola-Sannainen koekohteen kemialliset analyysit vesinäytteistä. Vertailu VTT:n liukoisuustestin tuloksiin.

Tutkimuksen kohde	Yksikkö	VTT:n liukoisuustesti (vesiravistelukoe)		Koekohteen analyysit - H:gin kaupungin Ympäristölaboratorio				
		pohjavesiputki		lysimetri				
		1 vko (toukok.-97)	1 kk (toukok.-97)	elokuu-97 (0-näyte)	marrask.-97 näyte 1	marrask.-97 näyte 2	marrask.-97 näyte 1	marrask.-97 näyte 2
metallit								
Kromi, Cr	mg/l	-	-	0,003	0,006	0,003	0,005	0,005
Kupari, Cu	mg/l	0,005	0,012	0,022	0,057	0,03	0,044	0,031
Sinkki, Zn	mg/l	0,1	0,04	0,08	0,44	0,22	0,12	0,068
Lyijy, Pb	mg/l	-	-	0,084	0,058	0,031	<0,001	<0,001
Mangaani, Mn	mg/l	0,3	0,06	0,044	0,33	0,71	1,2	1,2
Rauta, Fe	mg/l	0,1	0,48	1,4	2,2	2,2	0,23	0,22
Muut								
Sulfaatti, SO ₄	mg/l	6,5	9,4	26,9	22	17	370	380
pH	-	7,3	7,4	7,06	7,29	7,32	7,5	7,4
Sähkönjohtavuus	mS/m	19,5	105	23,4	72,7	160	152	152
Redox-potentiaali	mV	380	380	310	280	174	222	223

Vertailtaessa taulukon 11 tuloksia toisiinsa tulee ottaa huomioon, että VTT:n vesiravistelutestissä kumirouheen kokoa oli pienennetty puoleen liuotuksen jouduttamiseksi (1,5 cm x 2 cm) ja testissä käytetty vesi on erittäin puhdasta (tislattua). Lisäksi testissä käytetyn vesimäärän (L) suhde kiinteän rengasrouhemateriaalin (S) massa oli 10. Yksikkö alkuperäisissä tuloksissa oli siten mg/kg (rengasrouhetta) eli taulukkoon 11 on VTT:n tulokset jaettu 10:lla, jotta on saatu yksiköksi mg/l (vettä). Koekohteessa rengasrouhemassa ei kuitenkaan ole kosketuksissa laimennusuhteen L/S=10 mukaisen vesimäärän kanssa vaan suhde on huomattavasti pienempi.

VTT:n testiin verrattuna koekohteen pitoisuudet ovat yllättävän isoja ottaen huomioon, että vesiravistelutesti on kuitenkin suhteellisen raju. Kuparin, sinkin ja kromin arvot sekä pH- ja redox-potentiaali ovat lähellä toisiaan, mutta mangaanin arvo lysimetristä otetusta vesinäytteestä on paljon suurempi. Sadevesi saattaa liuottaa enemmän mangaania. VTT:n pienen sulfaattiarvon

perusteella voidaan arvioida koekohteen suurten arvojen johtuvan muusta kuin suoraan rengasrouheesta.

Liitteessä 9 on lisäksi esitetty taulukko VTT:n testissä ja koekohteen vesinäytteistä määritetyistä PAH-pitoisuuksista (hiilivedyt), joiden perusteella rajulla vesiravistelulla on saatu irtoamaan em. aineita paljon enemmän. Pitoisuudet ovat kuitenkin yleisesti ottaen hyvin pieniä. Koekohteen arvot ovat aivan määrittystarkkuuden rajoilla.

Taulukkoon 12 on lisätty koekohteen pitoisuuksien lisäksi yleisiä Suomen vesistöjen taustapitoisuuksia, joihin verrattuna lysimetrin mangaani-, sinkki- ja kupari-pitoisuudet ovat suurempia. Näiden aineiden pitoisuuksien voidaan arvella tulevan suoraan rengasrouheesta (kumipalat / teräslangat). Pohjaveden lyijypitoisuus on melko suuri tausta-arvoon verrattuna juuri koealueen mahdollisen likaantumisen vuoksi, sillä Vt7 moottoriliikennetie kulkee pohjaveden varsinaisen muodostumisalueen poikki ilman suojausta koekohteen vieressä.

Taulukko 12. Koekohteen analyysit metallien osalta. Pitoisuuksien vertailua Suomen vesistöjen taustapitoisuuksiin.

Tutkittu metalli	Yksikkö	Koekohteen analyysit - Hgin kaupungin Ympäristölaboratorio						Suomen vesistöjen taustapitoisuudet			Enimmäispitoisuus talousvedessä
		pohjavesiputki			lysimetri			Pohjavesi		Pintavedet	
		elokuu-97 (0-näyte)	marrask-97 näyte 1	näyte 2	marrask-97 näyte 1	näyte 2	keskiarvo	mediaani	(järvi-, joki- ja purovedet)		
Metallit											
Kromi, Cr	mg/l	0,003	0,006	0,003	0,005	0,005	-	-	0,005...0,0007	0,05	
Kupari, Cu	mg/l	0,022	0,057	0,03	0,044	0,031	0,0046	0,002	0,003	1	
Sinkki, Zn	mg/l	0,08	0,44	0,22	0,12	0,068	0,322	0,1	0,015	3	
Lyijy, Pb	mg/l	0,084	0,058	0,031	<0,001	<0,001	0,0012	0,001	0,003	0,01	
Mangaani, Mn	mg/l	0,044	0,33	0,71	1,2	1,2	-	-	0,023...0,029	-	
Rauta, Fe	mg/l	1,4	2,2	2,2	0,23	0,22	-	-	0,19...0,68	-	

Seuraavissa taulukoissa 13 ja 14 on esitetty vertailun vuoksi myös Yhdysvalloissa rakennettujen rengasrouhekohteiden ympäristöanalyysien tuloksia. Taulukossa 13 on pelkästään Wisconsinissa tehdyn kohteen tuloksia /Eldin and Senouci 1992/, jotka on esitetty keskiarvona 6 kuukauden aikana kehittyneistä pitoisuuksista ja lisäksi liitteestä 10 voidaan seurata Wisconsinin koekohteen pitoisuuksien kehitystä tarkemmin 6 kk:n ajalta. Wisconsinin koekokeuksilla 2 ja 5 on päällysrakenteen paksuus ainoastaan 0,3 m ja tie on sorapäällysteinen, joten vesi pääsee lysimetreihin helposti päällysrakenteen ja 1,5 metriä paksun rengasrouhekerroksen läpi.

Taulukkoon 14 on kerätty tietoa muistakin koekohteista maksimiliukoisuuksien osalta. Mainen koekohde on ainoa, jossa rengasrouhe on pohjavesipinnan alapuolella. Lysimetrialtaat on kaikissa kohteissa rakennettu heti RR-kerroksen alapuolelle lukuunottamatta Richmondia, jossa keruukaivo on asennettu tien luiskaan.

Taulukko 13. Ilola-Sannainen lysimetrinäytteiden tulosten vertailu Wisconsinin kohteiden analyysihin.

Tutkimuksen kohde	Yksikkö	Wisconsin test embankment			Ilola-Sannainen lysimetri	
		Koeosuus 2 (west lysimeter) 4-9/90*	Koeosuus 5 (east lysimeter) 4-9/90*	maalisk.-91	marrask.-97 näyte 1	näyte 2
metallit						
Kromi, Cr	mg/l	-	-		0,005	0,005
Kupari, Cu	mg/l	-	-		0,044	0,031
Sinkki, Zn	mg/l	0,0152	0,232	0,56	0,12	0,068
Lyijy, Pb	mg/l	0,003	0,007	0,022	<0,001	<0,001
Mangaani, Mn	mg/l	0,917	0,835	3,2	1,2	1,2
Rauta, Fe	mg/l	0,312	0,483	0,7	0,23	0,22
Muut						
Sulfaatti, SO ₄	mg/l	126	140,4	450	370	380
pH	-	7,57	7,54	7,7	7,5	7,4

Taulukosta 13 havaitaan selvästi mangaanipitoisuuden suuri kasvu Wisconsinissa puolen vuoden tuloksista maaliskuun-91 tulokseen verrattuna (kts. liite 10). Myöskin sinkin ja raudan pitoisuudet ovat selvästi kohonneet joskin hitaammin. Ilola-Sannainen kohteiden tulokset ovat hyvin lähellä Wisconsinin pitoisuuksia. Tulevien mittausten avulla nähdään miten pitoisuudet Ilolan kohteessa kehittyvät verrattuna esim. Wisconsinin maaliskuun tuloksiin.

Taulukko 14. Eri koekohteissa Yhdysvalloissa mitattujen maksimiliukoisuuksien vertailua Ilola-Sannainen kohteiden lysimetreistä otettuihin ensimmäisiin vesinäytteisiin.

Tutkimuksen kohde	Yksikkö	WISCONSIN		RICHMOND (Maine)	NORTH YARMOUTH (Maine)		MAINE (pohjavedenp. alapuolella)	Ilola-Sannainen (lysimetri - marrask-97)	
		Koeosuus 2	Koeosuus 5		koeosuus C	koeosuus D		näyte 1	näyte 2
metallit									
Kromi, Cr	mg/l	-	-	-	0,064	0,07	0,007	0,005	0,005
Kupari, Cu	mg/l	-	-	-	-	-	0,019	0,044	0,031
Sinkki, Zn	mg/l	0,56	0,75	< 0,1	1,1	0,013	0,123	0,12	0,068
Lyijy, Pb	mg/l	0,022	0,005	< 0,057	< 0,057	< 0,057	< 0,015	<0,001	<0,001
Mangaani, Mn	mg/l	-	-	0,29	0,9	3,2	3,43	1,2	1,2
Rauta, Fe	mg/l	5,3	4	< 0,1	1,5	4,8	87	0,23	0,22
Muut									
Sulfaatti, SO ₄	mg/l	450	150	65	58	25	22	370	380

Taulukon koekohteiden pitoisuudet on kerätty lähteestä /Humphrey 1995/. Taulukon 14 koekohteista ei ole tarkkoja tietoja, mutta ainakin Wisconsinin ja Richmondin kohteet /Eaton et al 1994/ ovat sorapäällysteisiä. Taulukosta voidaan kuitenkin nähdä pitoisuuksien olevan yleisesti lähellä toisiaan. Pohjavedenpinnan alla olevan rengasrouhekohteen (Maine) pitoisuudet ovat raudan ja mangaanin osalta suuria. North Yarmouthin tuloksista sinkin ja mangaanin osalta voidaan mahdollisesti päätellä, että sinkki-pitoisuuden ollessa korkea mangaanin arvo on puolestaan pieni ja päinvastoin. Yhdysvalloissa käytetyn rengasrouheen laadussa saattaa olla suuriakin eroavaisuuksia esim. renkaan sidontamateriaaleissa, mitkä saattavat vaikuttaa liekeneviin aineisiin.

Yhteenvedona Ilola-Sannainen koekohteen vesinäytteiden ensimmäisistä tuloksista voidaan päätellä, että määritetyt pitoisuudet ovat hyvin kuitenkin pieniä. Tämän perusteella voidaan alustavasti arvioida materiaalin soveltuvan hyvin sijoitettavaksi pehmeikölle rakennettaviin tien kevennyksiin.

Varmaa tietoa ei kuitenkaan ole, kuinka keväisin mahdollisesti rakenteeseen nouseva tulvavesi vaikuttaa rengasrouheen liukenevuuteen. Myös tulosten vertailu voi vaikeutua tulvaveden johdosta, kun ei tiedetä laimennuksen suuruutta ja kaivoon tierakenteen kautta imeytyvien tulvavesien laadusta. Rengasrouheesta liekenevat pitoisuudet eivät todennäköisesti läpäise tierakenteen alapuolista paksua pehmeikköä, joten todennäköisin rengasrouheesta uuttuvan veden laskusuunta on tienvarren sivuoja ja Ilolanjoki.

7 TOTEUTUNEET RAKENTAMISEN MASSAT JA KUSTANNUKSET

Seuraavassa taulukossa 15 on esitetty Iloa-Sannainen rengasrouhekohteen rakentamisen massamäärät ja kustannusarvio suunnitelman ja toteutuneen kohteen mukaan. Yksikköhinnoissa tummennetut arvot ovat tarkkoja toteutuneiden kustannusten ja määrien mukaan laskettuja hintoja. Taulukossa ei ole mukana kaikkia rakentamisen kustannuksia, koska niiden toteumasta ei ollut vielä tarkkoja tietoja (esim. teräsverkko, geovahvisteet, muovirumpu, nurmetus). Seurantajärjestelmän kustannukset nostivat luonnollisesti kohteen kokonaiskustannuksia (instrumentointi + mittaukset).

Taulukko 15. Iloa-Sannainen koekohteen rakennuskustannukset suunniteltujen ja toteutuneiden massojen mukaan

Littera	Työselite	Suunniteltu määrä	Yks.hinta	Kustannus	Toteutunut määrä		Yks.hinta	Kustannus
		[m ³ -rtr/m ²]	[mk/yks]	[mk]	[t]	[m ³ -rtr / m ²]	[mk/yks]	[mk]
2110	Maaleikkaus, läjitykseen	3440	10	34400	6390	3651	10	36510
2140	Maaleikkaus, välivarastoon	1700	10	17000	6852	3606	10	36060
4180	Rengasrouhe, RR2	3200	90	288000	1914	3738	92,2	344643,6
4371	Luiskatäyte	780	10	7800	1031	589	10	5890
4431	Jakava, välivarasto	1700	20	34000	5953	3133	20	62660
4432	Jakava, uusi materi 0-100 mm	1020	50	51000	2746	1017	50	50850
4500	Kantava kerros 0-50 mm	840	60	50400	889	329	60	19740
4450	Suodatinkangas KL4	8750	5,5	48125	-	9750	4,7	45825
5210	Päällyste PAB-V1500	2600	25	65000	-	2344	24	56256
				yhteensä	595725			
								yhteensä 658434,6

Taulukosta nähdään kuinka koekohteessa toteutuneen rengasrouheen määrä on noin 500 m³ suurempi kuin suunnitelman perusteella arvioitu. Tämä saattaa johtua myös, että kaivuvaiheessa on kaivettu hieman liian leveältä Rengasrouheen suuremman määrän vuoksi myös toteutuneet kokonaiskustannukset ovat suunniteltua suuremmat. Suuren kokoonpuristumisen vuoksi rengasrouheen materiaalimenekin arviointiin ja laskemiseen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota tulevaisuuden kohteissa. Materiaalin yksikköhinta tulee olemaan yksikössä mk/t.

Toteutuneen rengasrouhemäärän (3738 m³-rtr/1914t) perusteella laskettu materiaalin tilavuuspaino on $\gamma = 5,1 \text{ kN/m}^3$, kun suunnitelman mukaisen m³-määrän (3200 m³-rtr/1914 t) mukaan tilavuuspaino olisi ollut 5,9 kN/m³. Rengasrouheen määrän arviointi perustuu kasettiautojen punnitukseen terminaaleissa sekä yhden auton lavan mittojen mukaan laskettua tilavuuteen (m³-määrä). Toteutuneissa määrissä on pientä epätarkkuutta, koska Keimolan terminaalissa rengasrouhekasat olivat märkiä ja vettä kulkeutui kasettiautojen lavoille. Lisäksi kaikkia autoja ei mahdollisesti saatu kuormattua aivan täyteen, mikä aiheuttaa pientä virhettä tilavuuden arviointiin.

8 YHTEENVETO

Uudenmaan tiepiirissä Ilola-Sannainen paikallistiellä 11863 toteutettiin elokuussa -97 painuman korjaus uudella uusiomateriaalilla rengasrouheella (RR2). Tämä koerakennusprojekti kuuluu yhtenä osana Tielaitoksen ja Säkivälineen yhteistyöprojektiin, jonka tavoitteena on tutkia rengasrouheen soveltumista tierakenteisiin sekä pitkällä aikavälillä edistää rengastuotteiden käyttöä valtakunnallisesti. Tässä raportissa on ensisijaisesti kerrottu koetien rakentamisesta sekä esitetty seurantamittausten tuloksia ja alustavaa analysointia. Rengasrouheen ympäristövaikutusten seuranta on koerakenteen kuormituskestävyyden analysoinnin lisäksi hankkeen tärkeimpiä tutkimuskohteita, jotta ns. jätemateriaalista saataisiin yleisesti maarakentamisessa käytettävä rakennusmateriaali.

Koetien tasauksen korottaminen rengasrouhekevennyksen avulla suunniteltiin Uudenmaan tiepiirissä. Rengasrouhekerroksen paksuus noin 350 metrin koeosuudella vaihtelee välillä 0,35-1,35 m. Kevennyksen paksuus mitoitettiin painuma- ja kantavuuslaskelmien optimointitehtävänä samalla huomioiden tavoitteet kustannussäästöistä. Tulevaisuudessa rengasrouherakenteiden suunnittelussa olisi järkevää hyödyntää elementtimenetelmään perustuvia laskentaohjelmia painuma- ja kantavuusmitoitukseen, jotta voitaisiin tarkemmin kuvata joustavan ja kimmoisan RR2-materiaalin ja jäykän päällysrakenteen yhteistoimintaa rakenteessa.

Kokemukset rengasrouheella rakentamisesta olivat kaikella tavalla positiivisia. Koetien rakentamiseen kului aikaa yhteensä 3 viikkoa, jonka aikana ei ollut mitään suuria ongelmia ja työn viivytyksiä. RR2-materiaalin lavalta kippauksessa ei esiintynyt ennakkoon pelättyä jumiutumista. Rengasrouhetta oli helppo työstää suunniteltuun muotoonsa ja luiskien reunalla pystyi helposti työskentelemään ilman että tapahtui rakenteen leviämistä sivulle päin. Tulevissa rengasrouhekohteissa kannattaa käyttää isompaa puskukonetta materiaalin levittämiseen, jolloin levitysmatka on pidempi ja samalla rakenteen tiivistäminen tehokkaampaa. Rakentamisen aikana havaittiin työmenetelmistä, että rengasrouherakenteen sivuille kannatti tehdä tukipenkereet ennen jakavan kerroksen materiaalin rakenteeseen ajoa. Tällä tavoin estettiin RR-kerroksen painumista eniten keskeltä ja materiaalin leviämistä sivuille. Tämän lisäksi havaittiin päällysrakenteen tiivistystyön onnistuvan jyrällä vasta, kun sitomattomia rakennekerroksia oli tehty noin 0,7 metrin verran RR-kerroksen päälle.

RR2-materiaali on erittäin kimmoisaa ja joustavaa ja sen muodonmuutokset ovat lähes kokonaan palautuvia, joten rengasrouheella kevennettävän tierakenteen kantavuusmitoituksessa päällysrakenteen paksuudella on merkittävin vaikutus rakenteella saavutettavaan kestävyteen liikennekuormia vastaan. Rengasrouherakenteille ei voida vielä määrittää tavoitetta kantavuuden suhteen ennen kuin pitempiaikaisella koerakenteen tarkkailulla sekä uusilla koekohteilla voidaan paremmin ymmärtää rakenteen käyttäytymistä liikennekuormituksen alaisena. Rakenteen kuormituskestävyyden seuranta käsittää kantavuusmittauksia ja silmämääräistä tien kunnon analysointia (pysyvyys, halkeamat, muodonmuutokset).

Ilola-Sannainen koetien kantavuutta rakentamisen aikana ja jälkeen mitattiin sekä staattisella levykuormituslaitteella että dynaamisella pudotuspainolait-

teella. Kantavan kerroksen ja päällysteen päältä mitatut E_2 -kantavuusarvot olivat varsin pieniä eivätkä täyttäneet tieluokan 4AB normaalin tierakenteen tavoitetta. Teräsverkon kantavuutta lisäävä vaikutus oli vähäinen (keskim. 10 MPa) ja päällystämällä vaikutus kantavuusarvojen kasvuun oli myös pieni (keskim. 15 MPa). Käytetyn pehmeän päällysteen PAB-V1500 ominaisuuksista ei kuitenkaan tiedetä tarpeeksi, joten kantavuus voi kasvaa vielä päällysteen viskositeetin kasvaessa.

Pudotuspainolaitteella mitattujen taipumasuppiloiden perusteella voitiin paremmin analysoida rakenteen käyttäymistä. Taipumakuvaajien perusteella nähtiin selvästi kuinka RR-rakenne toimii täysin eri tavalla kuin teoreettinen mitoitettu rakenne, vaikka laskelmissa käytetyt E-moduulit mitoitettulla rakenteella ovat suuremmat. Kantavan kerroksen ja päällysteen päältä mitattujen taipumasuppiloiden (liitteet 6 ja 7) muoto on suhteellisen jyrkkä eli rakenne antaa periksi suhteellisen paljon kuormituksen alla, mutta taipumat pienenevät jyrkästi kauempana kuormituksesta. Suurimmat muutokset taipuman muutoksessa tapahtuivat geofoneilla D20 ja D45, joista jälkimmäinen mitauskohta on mahdollisesti rakenteen kriittinen piste rakenteen kantavuuden kehittymisen kannalta. Tulevilla koetien kantavuusmittauksilla nähdään onko rakenteen mahdollisella kantavuuden kehittymisellä vaikutusta taipumasuppiloiden muotoon.

APAS-ohjelmalla suoritettiin myös koerakenteen E-moduulien takaisinlaskenta eli rakennekerrosten moduuleja muuttamalla taipumakäyrän muotoa sovitettiin vastaamaan mitattuja taipumasuppiloita. Tällä tavoin laskemalla rengasrouheen E-moduuliksi saatiin 2 MPa, kun teoreettisen rakenteen mitoituksessa käytettiin arvoa $E = 1$ MPa. Päällysrakenteen sitomattomien materiaalien E-moduulit takaisinlaskennasta olivat yllättäen mitoituksessa käytettyjä arvoja pienempiä.

Koetien siirtymämittauksien perusteella rakenteen kokonaispainuman kehittymistä on tapahtunut eniten koetien keskiosuudella eli noin 18-27mm. Tien keskiliinjalta mitatut tasot ovat kuitenkin vielä reilusti yli arvioidun tulvakorkeuden. Pitempiaikaisen painuman seurannan avulla voidaan arvioida rengasrouheen kevennysvaikutusta. Painuman mittauksen lisäksi paaluille 1100 ja 1180 asennetuista potentiometreistä mitattiin joulukuussa -97 (3kk rakentamisesta) rengasrouhekerroksen kokoonpuristumiseksi prosenteissa 12,4% ja 10 % (1100/1180), mitkä ovat järkeviä vertailtaessa tuloksia ulkomaisissa koekohteissa mitattuihin arvoihin.

Koekohteen vesinäytteiden ensimmäisten kemiallisten analyysien perusteella voidaan sanoa alustavasti, että RR2-materiaali ei tule aiheuttamaan ympäristölle suurta haittaa. Analysoitujen metallien ja PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat verrattain pieniä vertailtaessa tuloksia niin VTT:n liukoisuustestiin kuin Suomen vesistöjen taustapitoisuuksiin. Kuitenkin vasta koekohteen pidempiaikaisella vesinäytteiden laadun seurannalla saadaan kuva rengasrouheen todellisesta ympäristövaikutuksesta.

Tulevien rengasrouhekohteiden kannalta juuri kantavuuden hallinta on tärkein kysymys suunniteltaessa RR-rakennetta. Tarvittavan kuormituskestävyyden saavuttamiseksi olisi mahdollista kokeilla erilaisia vahvisteita RR-kerroksessa tai päällysrakenteessa. Kantavien kerrosten paksuutta voisi mahdollisesti ohentaa myös käyttämällä bitumilla sidottua kerrosta rakenteessa. Tulevissa kevennyskohteissa voisi kokeilla ns. yhdistelmärakenteita,

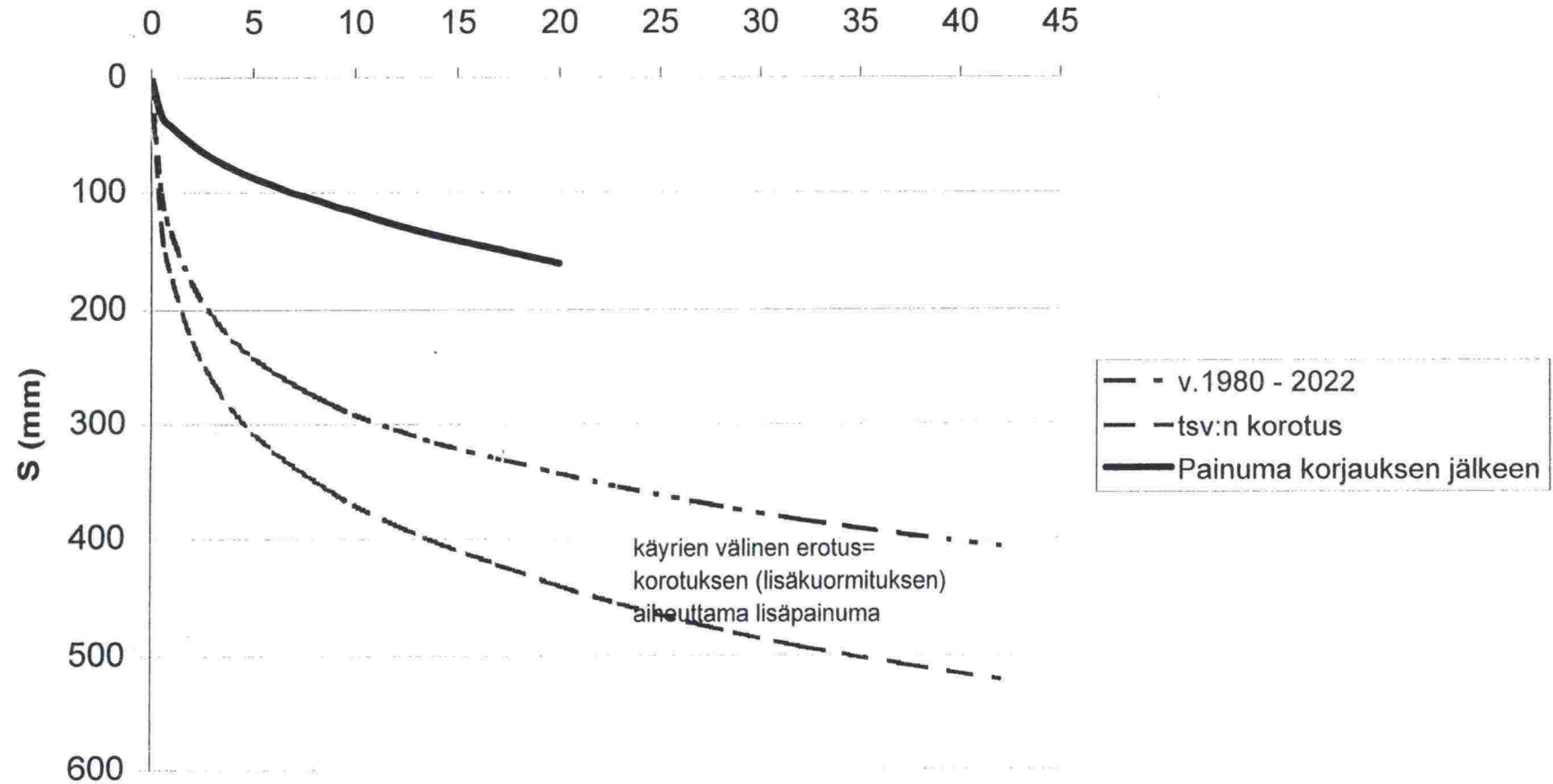
joissa kevennyskerros muodostetaan rengasrouheesta ja kevytsorasta. Tällöin kerrosten välisissä moduuleissa ei olisi niin suuria eroja. Näiden uusien mahdollisten rakennevaihtoehtojen suunnittelussa tulisi rakenteita tutkia alustavasti analyyttisellä kantavuusohjelmalla ja tarkemmin elementtimenettelmään perustuvilla ohjelmilla, joissa on mahdollista huomioida myös vaihteet. Teoreettisten tarkasteluiden perusteella toteuttamiskelpoisimmat rakenteet tultaisiin toteuttamaan koerakenteina. Tämän lisäksi kevyen liikenteen väylille vähäisemmän kuormituksen vuoksi tulisi kehittää omat kantavuusvaatimukset käytettäessä rengasrouhetta kevennyksenä. Tällöin rakenteissa voisi hyödyntää myös isompikokoista rengasrouhetta (RR1) esimerkiksi kevennyksen alaosassa, mikä alentaisi kustannuksia huomattavasti.

9 LIITTEET

- 1 Koekohteen painumalaskelma paalulta 1200 kevennyksen paksuuden mitoittamiseksi
- 2 Mitoitusraportti APAS.laskelmista
- 3 Seurantamittausten aikataulu (v.1997-1999)
- 4 Koekohteen rakentamisen kulku ja työjärjestys
- 5 Pudotuspainomittausten tulokset
- 6 Taipumasuppilot (plv 1050-1150) kantavan kerroksen päältä (25.9) tehdyistä pudotuspainokokeista
- 7 Taipumasuppilot (plv 1050-1150) päällysteen päältä (23.10) tehdyistä pudotuspainokokeista
- 8 Vaaitut tasot painumanastojen kohdilta
- 9 Vesinäytteistä määritetyt PAH-pitoisuudet (Ilola-Sannainen koekohde ja VTT:n vesiravistelutesti)
- 10 Wisconsinin koekohteen lysimetrien tulokset (huhti-syys -90)

Aika-painumakäyrät

t (a)



MITOITUSRAPORTTI

Kohde: Rengasrouhe 1

Vuorokausiliikenne (KVL)	550	(raskaiden osuus	11 %)
Kuormituskertaluku	0,4 E+6	(mitoitusaika	15 v)
Pohjamaa	Siltti (G)	(E-moduuli	5 MN/m²)

Rakenne: Toteutunut rakenne

Materiaali	[°C]	E-moduuli [MN/m²]	Paksuus [m]	Massa/m² [kg]	Massa/m [m³rtr]	Hinta/m [mk]
PAB-V	(+16,0)	2665	0,06	138	0,360	82,80
KaM(280)	(+17,0)	280	0,30	660	1,800	79,20
Sr(200)	(+17,0)	200	0,80	1760	4,800	211,20
RR2	(+17,0)	1	1,00			
Koko rakenne			2,16	4758	77,580	637,20

Standardiakseli : 100 kN (2 laskentakuormaa)
Tietokanta : c:\apas\apaso.mdb

Laskentatulokset

Rakenteen kerros	Väsymisfunktionarvo	Venymä [µs]	Kestoikä (v)	KKL
PAB-V	Vaakavenymä alareuna	362	25	0,6 E+6
KaM(280)	Pystyvenymä yläreuna	1354	18	0,4 E+6
Sr(200)	Pystyvenymä yläreuna	408	> 35	346,4 E+6
RR2	Pystyvenymä yläreuna	694	> 35	
Siltti (G)	Pystyvenymä yläreuna	109	> 35	432,7 E+6

MERKINNÄT

A = asennus + 1.mittaus

M = mittaus

N = näytteen analysointi

R = referenssitason analysointi

Seurantamittaus	1997					1998											
	elo	syys	loka	marras	joulu	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Kantavuusmittaukset																	
Vaaitus		M	M		M			M			M			M			M
-> tien painuma																	
	A	M			M			M			M			M			
Potentiometri																	
Vesinäytteet	R		N					N						N			
- pohjavesiputki																	
- lysimetrit (2 kpl)																	
			N					N						N			

Seurantamittaus	1999											
	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Vaaitus												
			M			M			M			M
Potentiometri												
Vesinäytteet			N						N			
- pohjavesiputki												
- lysimetrit (2 kpl)												
			N						N			

KOERAKENTAMISEN AIKATAULU / KULKU

TYÖVAIHE	VKO 34			VKO 35					VKO 36					VKO 37					VKO 38					VKO 39		VKO 40				
	20.8	21.8	22.8	25.8*	26.8	27.8	28.8	29.8	1.9*	2.9*	3.9*	4.9*	5.9	8.9	9.9*	10.9*	11.9	12.9	15.9	16.9	17.9	18.9	19.9	25.9	26.9	29.9	30.9	1.10	2.10	3.10
Ojien perkaus																														
Asfaltin jyrshintä																														
Kaivutyö																														
Suodatinkangas																														
Tierakenne																														
- RR2																														
- jakava																														
- teräsverkko																														
- kantava																														
Rumpu																														
Instrumentointi																														
- lysimetrit (2kpl)																														
- potentiometrit																														
- vaaitus-nastat																														
Kantavuusmitt.																														
- levykuorm.																														
- pudotuspaino																														
Tierakenteen																														
höyläys & jyräys																														
Luiskat																														
Asfaltointi																														

* = työaika keskim. 13-15 h

▨ = koe-erä RR2

▨ = RR2 Lappeenrannasta / Jakava - uusi materiaali

25.8

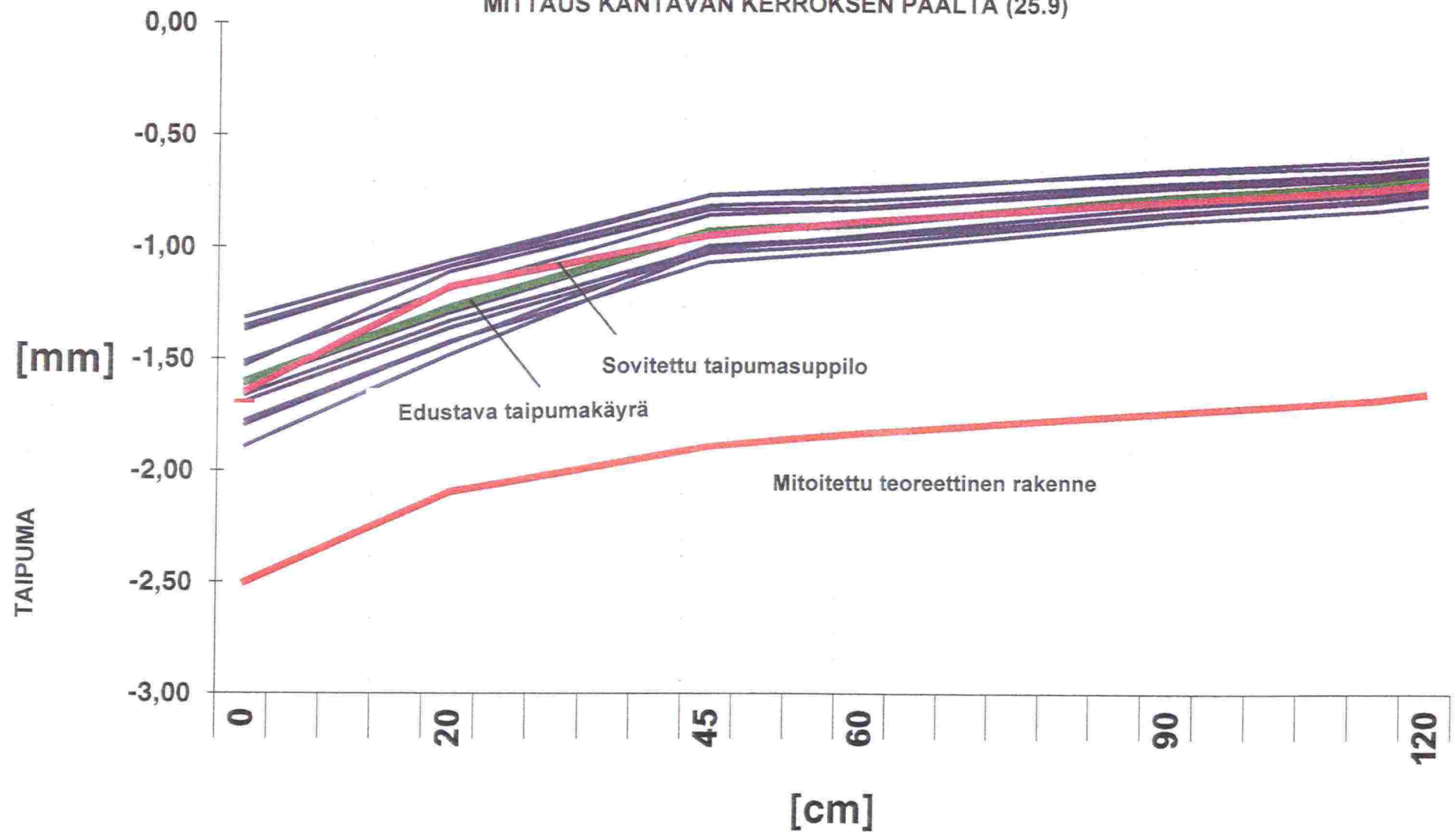
Tie suljettiin liikenteeltä !!

12.9

Tie avattiin liikenteelle!!

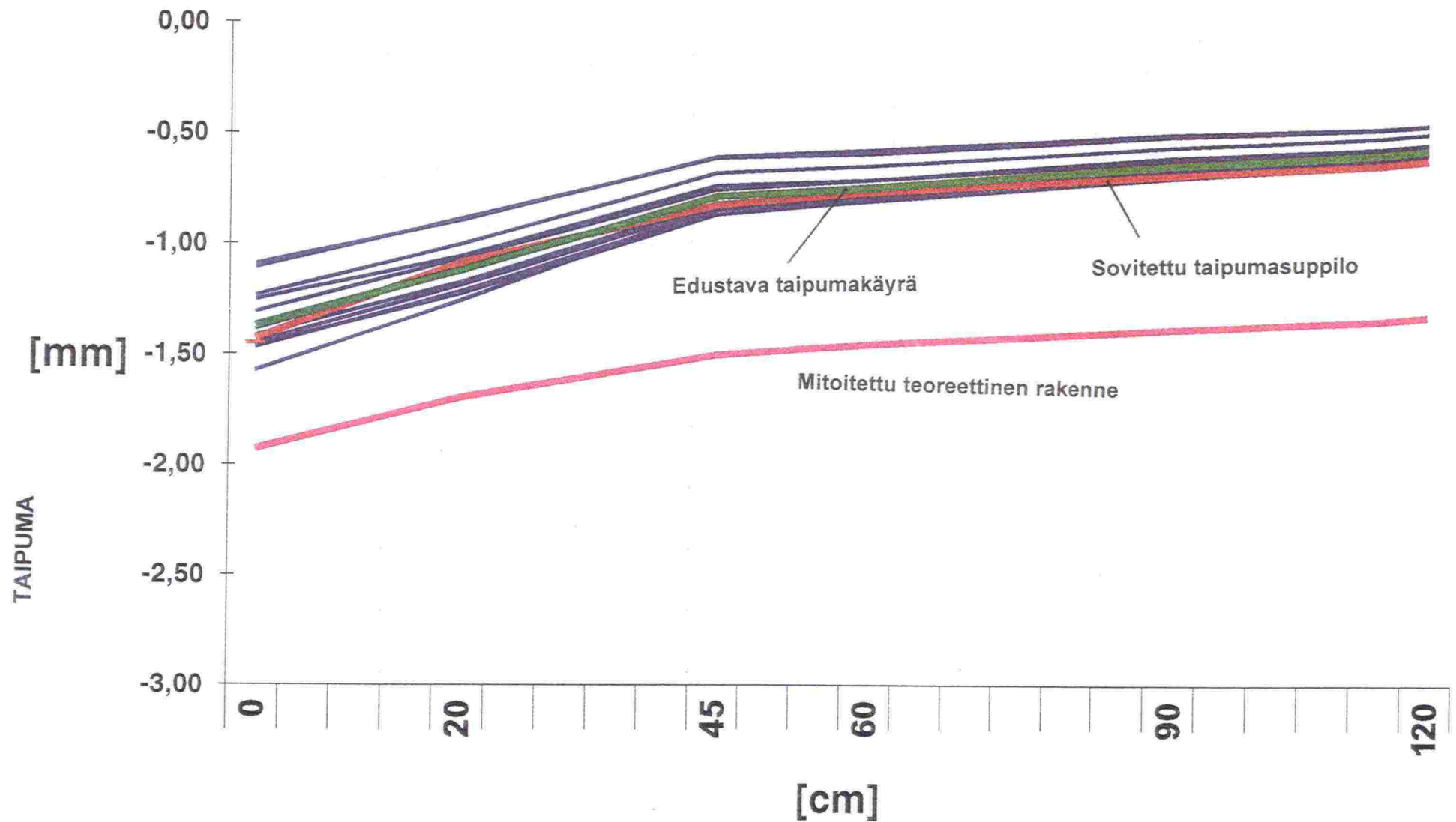
PAALU	Pudotuspainokoe		E2-mittaustulokset		Mittauskertojen välisiä eroja		
	15-Syy-97	25-Syy-97	30-Syy-97	23-Lok-97	erotus	erotus	erotus
	kantava kerros	kantava kerros	päällyste	päällyste	15.9->25.9	25.9->30.9	30.9->23.10
950	277	293	281	293	16	-12	12
970	96	97	121	125	1	24	4
980	72	93	109	115	21	16	6
990	77	82	97	105	5	15	8
1000	84	96	116	123	12	20	7
1010	80	96	117	121	16	21	4
1020	87	93	106	113	6	13	7
1030	70	83	102	103	13	19	1
1040	67	72	88	93	5	16	5
1050	65	82	92	96	17	10	4
1060	71	83	99	100	12	16	1
1070	82	90	108	112	8	18	4
1080	93	105	121	125	12	16	4
1090	88	102	123	127	14	21	4
1100	79	73	80	88	-6	7	8
1110	64	77	95	98	13	18	3
1120	73	101	110	110	28	9	0
1130	79	78	93	94	-1	15	1
1140	66	86	94	95	20	8	1
1150	74	91	104	106	17	13	2
1155	-	105	117	115	-	12	-2
1160	147	163	176	182	16	13	6
1165	-	120	135	137	-	15	2
1170	84	101	120	121	17	19	1
1179	100	72	85	92	-28	13	7
1190	80	104	121	127	24	17	6
1200	79	103	112	113	24	9	1
1210	71	95	114	112	24	19	-2
1220	80	106	120	126	26	14	6
1230	72	105	117	121	33	12	4
1240	82	100	114	121	18	14	7
1250	77	93	111	117	16	18	6
1260	85	81	107	112	-4	26	5
1270	78	88	107	108	10	19	1
1280	76	87	111	115	11	24	4
1290	84	109	123	132	25	14	9
1300	92	99	126	135	7	27	9
1310	93	120	125	139	27	5	14
1320	-	123	145	156	-	22	11
1330	304	347	328	384	43	-19	56

MITTAUS KANTAVAN KERROKSEN PÄÄLTÄ (25.9)



ETÄISYYS KUORMITUSLEVYN KESKELTÄ

MITTAUS PÄÄLLYSTEEN PÄÄLTÄ (23.10)



ETÄISYYS KUORMITUSLEVYN KESKELTÄ

TIENPINNAN PAINUMINEN (painumanastat)

Paalu	02-Lok-97	14-Lok-97		06-Mar-97		14-Tam-98		Painuma YHTEENSÄ
	korkeus [m]	korkeus [m]	siirtymä [mm]	korkeus [m]	siirtymä [mm]	korkeus [m]	siirtymä [mm]	
940	2,939	2,935	-3,9	2,937	1,8	2,938	1,6	-0,5
	3,088	3,083	-4,8	3,086	3,0	3,087	0,5	-1,3
	3,202	3,197	-4,2	3,202	4,2	3,202	0,2	0,2
960	2,797	2,794	-3,3	2,797	3,3	2,799	1,5	1,5
	2,930	2,927	-3,3	2,929	2,1	2,933	4,4	3,2
	3,034	3,031	-3,1	3,035	3,9	3,035	0,4	1,2
980	2,692	2,687	-4,7	2,691	3,6	2,689	-1,9	-3
	2,760	2,754	-5,2	2,754	-0,4	2,751	-3,4	-9
	2,736	2,734	-2,7	2,735	1,8	2,732	-3,7	-4,6
1020	2,455	2,448	-6,9	2,451	2,6	2,443	-7,5	-11,8
	2,564	2,558	-6,5	2,557	-0,7	2,552	-5,5	-12,7
	2,464	2,459	-5,4	2,460	1,3	2,455	-5,5	-9,6
1060	2,507	2,497	-10,4	2,496	-0,9	2,485	-11,3	-22,6
	2,520	2,509	-10,3	2,508	-1,4	2,501	-6,8	-18,5
	2,375	2,366	-8,4	2,365	-1,4	2,356	-8,8	-18,6
1100	2,586	2,576	-9,7	2,571	-5,5	2,559	-12,2	-27,4
	2,502	2,492	-9,9	2,484	-7,4	2,477	-7,5	-24,8
	2,353	2,342	-10,7	2,338	-3,9	2,330	-7,9	-22,5
1140	2,551	2,541	-10,5	2,538	-2,4	2,531	-7,8	-20,7
	2,481	2,470	-10,9	2,466	-4,3	2,459	-7,1	-22,3
	2,322	2,311	-10,9	2,307	-3,3	2,298	-9,6	-23,8
1180	2,594	2,585	-8,8	2,584	-0,5	2,576	-8,1	-17,4
	2,480	2,470	-9,8	2,468	-2,5	2,459	-8,2	-20,5
	2,298	2,283	-14,6	2,280	-2,7	2,272	-8,1	-25,4
1220	2,557	2,547	-9,4	2,550	2,1	2,545	-4,2	-11,5
	2,532	2,521	-11,1	2,520	-1,2	2,515	-4,7	-17
	2,382	2,370	-12,0	2,370	-0,2	2,362	-7,9	-20,1
1260	2,466	2,456	-10,1	2,457	0,7	2,454	-2,4	-11,8
	2,536	2,527	-9,4	2,526	-0,1	2,523	-3	-12,5
	2,474	2,467	-7,1	2,468	0,4	2,461	-6,3	-13
1300	2,336	2,327	-9,3	2,328	0,8	2,321	-6,2	-14,7
	2,564	2,556	-7,7	2,557	0,5	2,554	-3	-10,2
	2,656	2,641	-15,7	2,652	11,7	2,648	-4,2	-8,2
1330	2,413	2,408	-4,5	2,412	3,4	2,420	8,7	7,6
	2,512	2,508	-4,6	2,510	2,1	2,521	11,7	9,2
	2,617	2,613	-4,3	2,616	3,3	2,627	10,3	9,3
1360	2,619	2,615	-4,0	2,618	3,2	2,620	1,8	1
	2,676	2,671	-4,1	2,674	2,9	2,707	32,9	31,7
	2,730	2,726	-3,7	2,730	3,3	2,742	12,8	12,4

(yksikkö µg/l)

PAH-yhdisteet (nimi)	VTT/Ravistelutesti		Pohjavesiputki			Lysimetri	
	Toukok.-97		Elok.-97		Marrask.-97	Marrask.-97	
	1 vko	1 kk	(0-näyte)	näyte 1	näyte 2	näyte 1	näyte 2
naftaleeni	0,29	0,29	0,021	0,096	0,0088	0,0754	0,0848
2-metyyli-naftaleeni	0,14	0,15	-	0,0084	0,0044	0,0148	0,0147
1-metyyli-naftaleeni	0,12	0,14	-	0,0039	0,0035	0,0098	0,0092
bifenyyl	0,05	0,07	<0,0041	0,0063	0,0048	0,005	0,0068
3-metyylibifenyyl	0,06	0,08	-	-	-	-	-
2,6-dimetyyli-naftaleeni	-	-	-	<0,012	<0,012	<0,012	<0,012
asenaftaleeni	-	-	-	0,0141	<0,0042	0,0065	0,0087
asenafteeni	0	0,02	-	0,0075	0,0054	0,0084	0,0081
dibentsoforaani	0,03	0,05	-	-	-	-	-
fluoreeni	0,06	0,08	-	0,0117	0,0096	0,0223	0,0219
dibentsofiofeeni	0,06	0,11	-	-	-	-	-
fenantreeni	0,3	0,52	-	0,0075	0,007	0,007	0,0072
antraseeni	0,02	0,06	-	-	-	-	-
2-metyylantraseeni	0,13	0,4	-	-	-	-	-
1-metyylifenantreeni	0,08	0,22	-	0,0039	0,0052	0,0039	0,006
2-fenyli-naftaleeni	0,02	0,08	-	-	-	-	-
fluoranteeni	0,16	0,46	0,0203	0,0121	0,0117	0,0112	0,0101
pyreeni	0,61	1,9	0,0153	0,0122	0,0108	0,0099	0,0071
bentso(a)fluoreeni	0	0	-	-	-	-	-
bentso(b)fluoreeni	0,05	0	-	-	-	-	-
bentso(b)nafto(2,1-d)tiofeeni	0,03	0,09	-	-	-	-	-
bentso(b)nafto(1,2-d)tiofeeni	0,02	0,06	-	-	-	-	-
bentso(a)antraseeni	0,01	0,02	-	-	-	-	-
kryseeni/trifenyyl	0,07	0,21	-	-	-	<0,0025	-
bentso(b + k) fluoranteeni	0,02	0,06	-	0,0025	-	-	-
bentso(e)pyreeni	0,06	0,2	-	-	-	-	-
bentso(a)pyreeni	0,02	0,08	-	-	-	-	-
peryleeni	0,01	0	-	-	-	-	-
indeno(1,2,3-cd)pyreeni	0	0,05	-	-	-	-	-
dibentso(a,h)antraseeni	0	0	-	-	-	-	-
bentso(g,h,i)peryleeni	0,22	0,34	-	-	-	-	-
koroneeni	0,13	0,24	-	-	-	-	-
PAH-SUMMA	2,8	5,9	0,0565	0,1861	0,0712	0,1742	0,1846

Tutkimuskohde	Yksikkö	Wisconsin test embankment					
		Koeosuus 2 (west lysimeter)					
		huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys
metallit							
Kromi, Cr	mg/l	-	-	-	-	-	-
Kupari, Cu	mg/l	-	-	-	-	-	-
Sinkki, Zn	mg/l	0,019	0,012	0,017	0,016	0,012	-
Lyijy, Pb	mg/l	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Mangaani, Mn	mg/l	0,17	0,2	0,22	0,35	2,5	2,06
Rauta, Fe	mg/l	0,05	0,05	0,24	0,57	0,26	0,39
Muut							
Sulfaatti, SO4	mg/l	130	97	130	150	140	110
pH	-	7,6	7,5	7,6	7,9	7,3	7,5

Tutkimuskohde	Yksikkö	Wisconsin test embankment					
		Koeosuus 5 (east lysimeter)					
		huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys
metallit							
Kromi, Cr	mg/l	-	-	-	-	-	-
Kupari, Cu	mg/l	-	-	-	-	-	-
Sinkki, Zn	mg/l	0,084	0,046	0,044	0,54	0,56	0,119
Lyijy, Pb	mg/l	0,009	0,003	0,005	0,004	0,015	0,006
Mangaani, Mn	mg/l	0,23	0,27	0,3	0,2	1,7	2,31
Rauta, Fe	mg/l	1,3	0,05	0,12	0,54	0,53	0,36
Muut							
Sulfaatti, SO4	mg/l	-	140	140	92	150	180
pH	-	-	7,7	7,4	7,8	7,5	7,3

ISBN 951-726-428-3
ISSN 0788-3722
TIEL 3200510